МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'17

Сборник докладов

10–14 апреля 2017 г.

ГУАП
Санкт-Петербург
2017

УДК 001
ББК 72
З13

З13 Завалишинские чтения’17: сб. докл. / СПб.: ГУАП, 2017. 351 с.: ил.

ISBN 978-5-8088-1220-8

Помещенные в сборник доклады отражают весь спектр направлений научных работ, проводимых факультетом: от проектирования отдельных элементов и устройств, технологий их создания, решения вопросов диагностики и разработки прикладного программного обеспечения до построения сложных систем и комплексов, различных по своему функциональному назначению.

Оргкомитет конференции

Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, ректор ГУАП
А. А. Оводенко – доктор технических наук, профессор, президент ГУАП
В. Ф. Шишлаков – доктор технических наук, профессор, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике
А. А. Ефимов – доктор технических наук, профессор кафедры управления в технических системах
А. Л. Ронжин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники

УДК 001
ББК 72

ISBN 978–5–8088-1220-8

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2017

УДК 629. 7. 036. 5. 062. 3. 001.24

О. Б. Белоногов
кандидат технических наук
ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева

ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В статье приводится новый полигармонический метод автоинтегрирования для расчета амплитудно-фазовых частотных характеристик нелинейных динамических объектов и систем управления.

Ключевые слова: *частотные характеристики, динамические объекты, системы управления.*

O. B. Belonogov
PhD, Tech.
S. P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia

A POLYGARMONIC METHOD FOR CALCULATING FREQUENCY RESPONSES OF NONLINEAR DYNAMIC PLANTS

The article considers a new polygarmonic autointegretoin method for computing frequency response characteristics of dynamic plants and control systems.

Keywords: *frequency response characteristics, dynamic plants, control systems.*

Для проведения идентификации параметров, оптимизации и оценки соответствия выбранному критерию устойчивости динамических объектов, регуляторов и следящих систем управления требуется определение амплитудных и фазовых частотных искажений, возникающих при отработке ими входных моногармонических сигналов (ВМС) на заданных частотах. Кроме этого, при проектировании регуляторов и следящих систем часто требуется определять полосы их пропускания. С этой целью проводятся расчеты амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЧХ).

В [1] авторами установлено, что переходные процессы втягивания в вынужденные колебания при ВМС даже у некоторых линейных динамических объектов могут длиться достаточно долго, а у такого звена, как консервативное, переходные процессы могут не заканчиваться вообще. Поэтому для нелинейных и некоторых линейных динамических объектов заранее никогда не известно число периодов ВМС, в течение которых длится переходный процесс втягивания в вынужденные колебания. Игнорирование этой особенности при расчетах ЧХ может приводить к существенным ошибкам.

В связи с этим теоретический и практический интерес представляет задача разработки методов и алгоритмов расчета ЧХ регуляторов и следящих систем, содержащих существенно нелинейные элементы и позволяющих получать результаты вычислений автоматически с заданной погрешностью вычислений и за минимальное время (так называемых методов автоинтегрирования).

Стремительное развитие вычислительной техники и совершенствование ее характеристик (в частности, возрастание уровня быстродействия компьютеров в последние годы) позволили практически полностью переориентировать методы расчета ЧХ динамических объектов и систем управления с приближенных, получаемых из переходных характеристик, на более точные, основанные на численном интегрировании дифференциальных уравнений систем при ВМС на фиксированных частотах и анализе откликов на эти воздействия методом Фурье.

Согласно этим методам процесс интегрирования дифференциальных уравнений динамического объекта на каждой из заданных частот продолжается до тех пор, пока средние значения вычисляемых параметров периодического отклика динамического объекта на ВМС не станут достаточно постоянными.

Анализ постоянства параметров реакций динамических объектов и систем на ВМС можно проводить различными способами, которые, в частности, могут быть основаны на сравнении вычисляемых значений амплитуд и фазовых

сдвигов или на сравнении вычисляемых значений коэффициентов Фурье исследуемых гармоник выходных сигналов (откликов).

В [2] показано, что наиболее эффективные алгоритмы метода автоинтегрирования должны базироваться на сравнении действительных и мнимых составляющих (коэффициентов Фурье) исследуемой гармоники (ИГ) периодического выходного сигнала (ПВС) динамического объекта на ВМС. При таком подходе к построению методов и алгоритмов сокращается продолжительность вычислений ЧХ динамических объектов.

В свою очередь анализ постоянства коэффициентов Фурье ИГ ПВС динамического объекта или системы управления может осуществляться различными вариантами:

1) сравнением значений коэффициентов Фурье на n-м периоде колебаний ВМС со значениями этих же параметров на $(n-1)$-м периоде (вариант метода автоинтегрирования без осреднения коэффициентов Фурье);

2) сравнением средних за последние l периодов значений коэффициентов Фурье ИГ ПВС на n-м периоде колебаний ВМС со средними за последние l периодов значениями этих же параметров на $(n-1)$-м периоде (вариант метода автоинтегрирования с локальным осреднением коэффициентов Фурье [3]);

3) сравнением средних за $n-k$ периодов значений коэффициентов Фурье ИГ ПВС, получаемых на n-м периоде ВМС (здесь k – число неанализируемых периодов), со средними значениями этих же параметров на $(n-1)$-м периоде (вариант метода автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье [4]);

4) сравнением значений коэффициентов Фурье ИГ ПВС на n-м периоде колебаний ВМС со средними за последние l периодов значениями коэффициентов Фурье ИГ ПВС на n-м периоде колебаний ВМС (первый комбинированный вариант метода автоинтегрирования);

5) сравнением значений коэффициентов Фурье ИГ ПВС на n-м периоде колебаний ВМС со средними за $n-k$ периодов значениями коэффициентов Фурье ИГ ПВС динамического объекта или системы управления, получаемыми на n-м периоде ВМС (второй комбинированный вариант метода автоинтегрирования);

6) сравнением средних за последние несколько периодов значений коэффициентов Фурье ИГ ПВС на n-м периоде колебаний ВМГС со средними за $n-k$ периодов значениями коэффициентов Фурье ИГ ПВС динамического объекта или системы управления, получаемыми на n-м периоде ВМС (третий комбинированный вариант метода автоинтегрирования).

В [2] указано, что наиболее эффективным алгоритмом моногармонического метода (МГ-метода) автоинтегрирования является вариант метода с полным осреднением коэффициентов Фурье. Этот метод существенно сокращает продолжительность вычислений и позволяет более точно рассчитывать ЧХ любых гармоник нелинейных динамических объектов. Однако точность вычисления ЧХ при таком методе также недостаточна потому, что переходный процесс втягивания динамического объекта в вынужденные периодические колебания заканчивается только тогда, когда средние значения коэффициентов Фурье и соответствующих им амплитуд и фазовых сдвигов всех составляющих гармоник ПВС становятся достаточно постоянными. Но такой подход к построению метода расчета ЧХ динамического объекта в принципе невозможен, так как число составляющих гармоник ПВС бесконечно. Тем не менее, точность метода расчета может быть повышена, если при анализе помимо исследуемой гармоники анализировать несколько близких к ней наиболее значимых гармоник. Такие методы расчета ЧХ называются полигармоническими.

В настоящей работе поставлена задача исследования работоспособности варианта нового полигармонического метода (ПГ-метода) автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье [5] для расчета ЧХ четных и нечетных гармоник нелинейных динамических объектов. При этом под работоспособностью метода понимается его способность в соответствии с предлагаемым алгоритмом вычислять ЧХ объекта.

Алгоритм метода предписывает завершение процесса интегрирования уравнений динамического объекта, регулятора или следящей системы управления на каждой из фиксированных частот ВМС после того, как относительные изменения сравниваемых параметров анализируемых гармоник станут по модулю меньше заранее заданного числа, регламентирующего погрешность вычислений.

Алгоритм ПГ-метода автоинтегрирования для расчета ЧХ первой гармоники динамического объекта, в котором дополнительно анализируются вторая и третья гармоники, имеет два основных цикла – по частоте и по времени, при этом ВМС вычисляется по соотношению [2]

$$U(t) = A\sin(2\pi f t),$$

где U – текущее значение сигнала; A – его амплитуда; f – частота сигнала; t – текущее время. На каждой из фиксированных частот f в цикле из нужного их диапазона выполняется интегрирование дифференциальных уравнений исследуемого динамического объекта.

В цикле по времени в течение первых k периодов ВМС, где искажения наиболее велики, а номер периода $i \le k$, операции анализа не проводятся. По завершении k-го периода на каждом из следующих периодов последовательно выполняются дальнейшие действия.

1. Вычисление коэффициентов Фурье первой гармоники ПВС и двух его дополнительных гармоник – второй и третьей по соотношениям:

$$P(i,l) \approx 2fhR_m(i,l),\ Q(i,l) \approx 2fhS_m(i,l),$$
$$l = 1,2,3,$$
$$R_m(i,l) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\left[Y\left(t_{i,j}\right)\sin\left(2\pi l f t_{i,j}\right) + Y\left(t_{i,j-1}\right)\sin\left(2\pi l f t_{i,j-1}\right)\right],$$
$$S_m(i,l) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\left[Y\left(t_{i,j}\right)\cos\left(2\pi l f t_{i,j}\right) + Y\left(t_{i,j-1}\right)\cos\left(2\pi l f t_{i,j-1}\right)\right],$$

где $P(i,l)$, $Q(i,l)$ – вычисленные на i-м периоде ВМС коэффициенты Фурье l-й гармоники ПВС $Y(t)$; h – шаг интегрирования; j – номер шага; $m = T/h$ – число шагов h, содержащихся в одном периоде ВМС, $t_{i,j} = iT + jh$, $j = \overline{0,m}$ – сетка моментов времени численного интегрирования методом трапеций.

Чтобы получить результаты расчетов с одинаковой точностью на каждой из фиксированных частот ВМС, шаг интегрирования h по времени варьируется и его значение в зависимости от частоты f вычисляется по выражению [2]

$$h = 1/\left(K_f f\right),$$

где K_f – коэффициент, величина которого определяет максимальное значение шага интегрирования по времени на минимальной частоте ВМС, обеспечивающего устойчивый процесс интегрирования. Он находится экспериментально для каждой конкретной математической модели динамического объекта, регулятора или системы управления.

2. Определение средних значений коэффициентов Фурье исследуемой и дополнительной гармоник ВПС за пройденное количество анализируемых периодов ВМС

$$P_c(n,l) = \frac{\sum_{i=k+1}^{n} P(i,l)}{n-k},\ Q_c(n,l) = \frac{\sum_{i=k+1}^{n} Q(i,l)}{n-k},\ l = 1,2,3,$$

где n – значение номера последнего периода ВМС.

3. Анализ достаточности постоянства средних значений коэффициентов Фурье анализируемых гармоник по выражениям

$$\left|\frac{|P_c(n,l)| - |P_c(n-1,l)|}{P_c(n,l)}\right| 100 \le \varepsilon,$$
$$\left|\frac{|Q_c(n,l)| - |Q_c(n-1,l)|}{Q_c(n,l)}\right| 100 \le \varepsilon,\ l = 1,2,3, \qquad (1)$$

где ε – число, регламентирующее заданную погрешность вычислений в процентах.

4. Если все неравенства (1) выполняются, тогда вычисляется относительная амплитуда B_l (коэффициент усиления) исследуемой l-й гармоники ВПС как отношение ее амплитуды, определяемой по средним значениям коэффициентов Фурье на последнем периоде ВМС, к его амплитуде A:

$$B_l = \frac{\sqrt{P_c^2(n,l) + Q_c^2(n,l)}}{A},\ l = 1,2,3. \qquad (2)$$

5. Вычисляется фазовый сдвиг ИГ ПВС к ВМС по средним значениям коэффициентов Фурье ИГ на последнем периоде ВМС:

$$\varphi_l = \begin{cases} \psi(n,l) \text{ при } P_c(n,l) > 0 \text{ и } Q_c(n,l) < 0; \\ -\pi + \psi(n,l) \text{ при } P_c(n,l) < 0 \text{ и } Q_c(n,l) < 0; \\ -\pi + \psi(n,l) \text{ при } P_c(n,l) < 0 \text{ и } Q_c(n,l) > 0; \\ -2\pi + \psi(n,l) \text{ при } P_c(n,l) > 0 \text{ и } Q_c(n,l) > 0; \\ \pi\left[-1 - 0{,}5\,\mathrm{sign}\,Q_c(n,l)\right] \text{ при } P_c(n,l) = 0; \end{cases}$$

$$\psi(n,l) = \mathrm{arctg}\frac{Q_c(n,l)}{P_c(n,l)},\ l = 1,2,3.$$

Для получения логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) вместо соотношения (2.2) используется выражение

$$A_{Ll} = 20\lg\left(\frac{\sqrt{\left[P_c(n,l)\right]^2 + \left[Q_c(n,l)\right]^2}}{A}\right),$$
$$l = 1,2,3.$$

Поскольку реальные динамические объекты и системы управления в большинстве своем содержат фильтрующие элементы, которые сглаживают нелинейности, содержащиеся в них, представляется целесообразным исследование работоспособности метода проводить с помощью математических моделей нелинейных объектов в чистом виде. Практика моделирования показывает, что для расчета существенно нелинейного объекта, не содержащего фильтрующих звеньев (например, апериодических), требуется на порядки большее число периодов интегрирования ВМС для достижения заданной точности вычислений.

Работоспособность ПГ-метода автоинтегрирования для расчета ЧХ нелинейных динамических объектов исследуем на примерах получения ЧХ первой гармоники нелинейного колебательного элемента с квадратичным вязким трением, а также первой, второй и третьей гармоник существенно нелинейного звена второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением (нелинейность – разрыв первого рода) для трех различных вариаций безразмерных величин амплитуды ВМС и силы сухого трения.

Пример 1. Математическая модель колебательного элемента с квадратичным вязким трением описывается дифференциальным уравнением с безразмерными переменными:

$$m\frac{d^2Y}{dt}+K_{\text{квт}}\left(\frac{dY}{dt}\right)^2\operatorname{sign}\left(\frac{dY}{dt}\right)+K_{\text{п}}Y=U, \quad (3)$$

где m – масса; Y – координата перемещения; $K_{\text{квт}}$ – коэффициент квадратичного вязкого трения; $K_{\text{п}}$ – коэффициент позиционной нагрузки. После приведения к нормальному виду Коши уравнение (3) можно представить как

$$\left.\begin{aligned}\frac{dY}{dt}&=V,\\ \frac{dV}{dt}&=\left(U-K_{\text{квт}}V^2\operatorname{sign}(V)-K_{\text{п}}Y\right)m^{-1},\end{aligned}\right\}$$

где V – безразмерная скорость.

Пример 2. Математическая модель звена второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением представляет собой систему следующих нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих тестовый элемент для условий покоя и движения:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dY}{dt}&=V,\\ \frac{dV}{dt}&=F_R\,m^{-1},\end{aligned}\right\}$$

где F_R – безразмерная движущая сила, действующая на выходной орган колебательного элемента, для режимов покоя и движения

$$F_R=\begin{cases}U-F_{\text{с.т}}\operatorname{sign}(V)-K_{\text{п}}Y \text{ при } V\neq 0;\\ U-F_{\text{с.т}}\operatorname{sign}\left(U-K_{\text{п}}Y\right)-K_{\text{п}}Y \text{ при } V=0\\ \text{и } \left|U-K_{\text{п}}Y\right|>F_{\text{с.т}};\\ 0 \text{ при } V=0 \text{ и } \left|U-K_{\text{п}}Y\right|\le F_{\text{с.т}},\end{cases}$$

здесь $F_{\text{с.т}}$ – безразмерная сила сухого трения.

Для проведения вычислительных экспериментов были приняты следующие значения безразмерных параметров, обеспечивающие собственную резонансную частоту обоих вариантов колебательного элемента приблизительно 10 Гц, а именно: $m = 2{,}533\cdot10^{-2}$, $K_{\text{квт}} = 0{,}001$, $K_{\text{п}} = 1{,}0$, $A = 0{,}01$.

Вычислительные эксперименты с существенно нелинейным звеном второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением были проведены для следующих значений безразмерной силы сухого трения $F_{\text{с.т}}$: 0,001; 0,008; 0,0095.

ЧХ колебательного элемента с квадратичным вязким трением рассчитывались для следующего ряда фиксированных частот f (Гц): 0,1; 0,13; 0,2; 0,23; ... 0,9; 0,93; 1,0; 1,3; 2,0; 2,3; ... 9,0; 9,3; 10; 13; 20; 23; ... 90; 93; 100; 130; 200; 230; ... 900; 930; 1000.

ЛЧХ колебательного элемента с сухим трением рассчитывались в диапазоне частот 0,1–10,0 Гц из приведенного выше ряда.

На рис. 1 представлены ЛЧХ первой гармоники колебательного элемента с квадратичным вязким трением, рассчитанные традиционным МГ-методом автоинтегрирования [2] и предлагаемым новым ПГ-методом при заданной погрешности вычислений $\varepsilon = 0{,}1\%$.

Как видно из сопоставления графиков (рис. 1), рассчитанные с помощью предлагаемого ПГ-метода ЧХ имеют гладкий монотонный характер, в то время как ЧХ, рассчитанные с помощью традиционного МГ-метода автоинтегрирования, имеют выбросы в области высоких частот.

Таким образом, вследствие того, что анализ завершенности переходного процесса втягивания нелинейного динамического объекта в вынужденные периодические колебания проводится не только по исследуемой гармонике, но и по нескольким дополнительным гармоникам, повышается точность вычисления его амплитудно-фазовых ЧХ.

На рис. 2–4 представлены результаты вычислительных экспериментов по определению ЛЧХ первой, второй и третьей гармоник выходного периодического отклика звена второго порядка с классическим сухим (кулоновым) трением на ВМС с погрешностью вычислений $\varepsilon = 0{,}01\%$ для значений нормированной безразмерной силы сухого трения $\bar{F}_{\text{с.т}} = F_{\text{с.т}}/A = 0{,}1;\ 0{,}8;\ 0{,}95$. На них и далее сплошной линии соответствует значение $\bar{F}_{\text{с.т}} = 0{,}1$, штрихпунктирной – $\bar{F}_{\text{с.т}} = 0{,}8$ и пунктирной – $\bar{F}_{\text{с.т}} = 0{,}95$.

На рис. 5 представлены зависимости потребного числа n периодов интегрирования ВМС, необходимых для достижения заданной погрешности вычислений ЛЧХ исследуемых гармоник

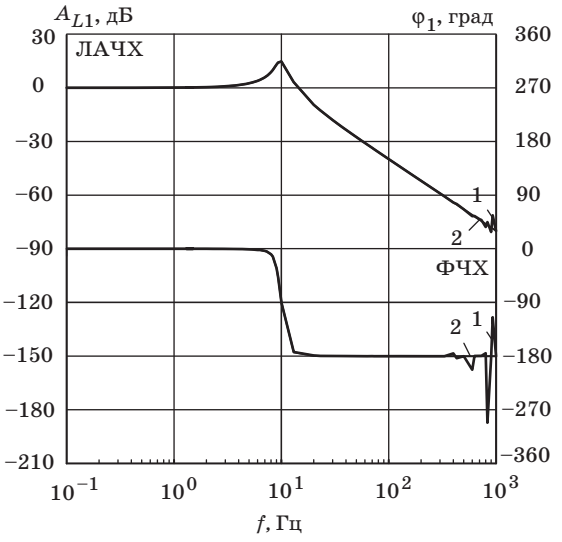


Рис. 1. ЛЧХ первой гармоники колебательного элемента с квадратичным вязким трением, рассчитанные: 1 – моногармоническим методом; 2 –полигармоническим методом

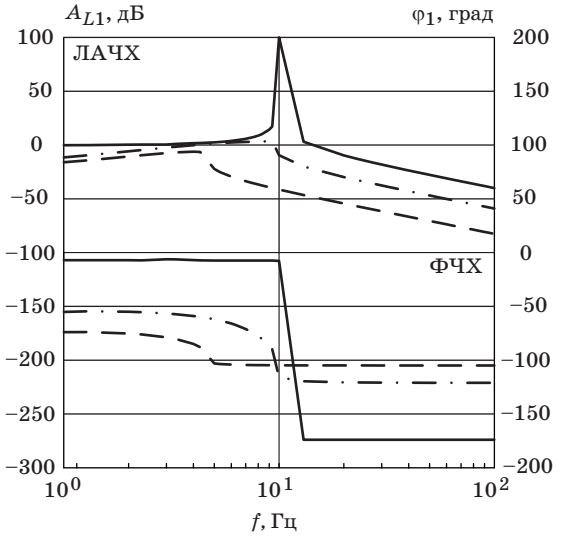


Рис. 2. ЛЧХ первой гармоники звена второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением

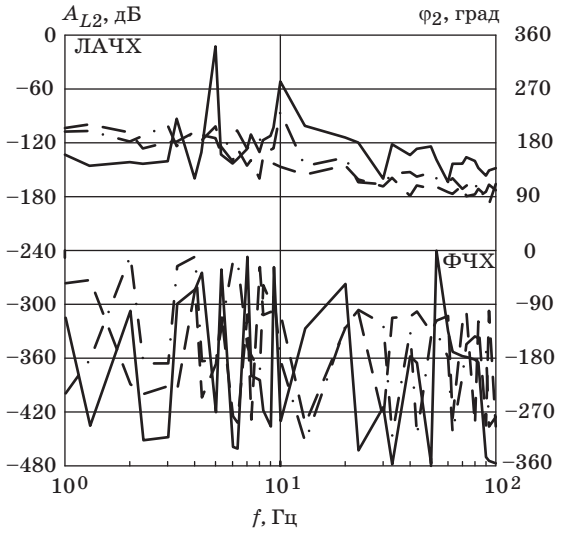


Рис. 3. ЛЧХ второй гармоники звена второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением

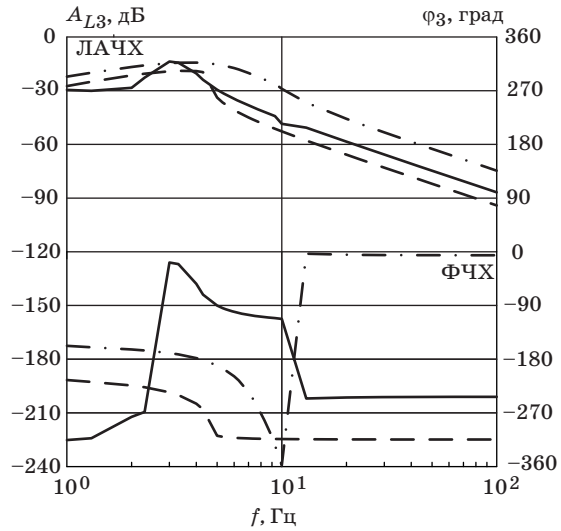


Рис. 4. ЛЧХ третьей гармоники звена второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением

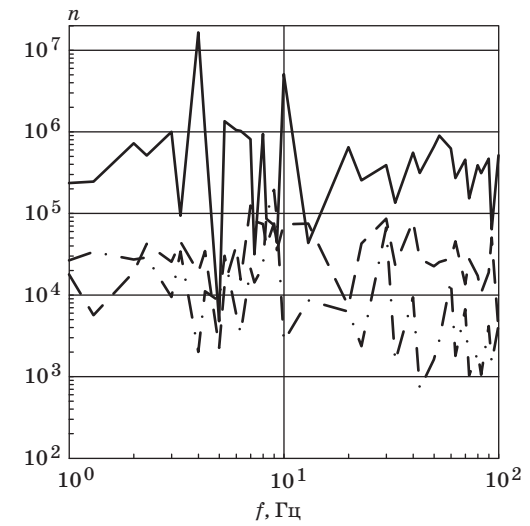


Рис. 5. Количество периодов интегрирования, необходимых для достижения заданной точности вычислений ЛЧХ звена второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением

периодического отклика звена второго порядка с классическим сухим (кулоновым) трением на ВМС, от частоты ВМС f для указанных выше значений безразмерной силы сухого трения. Поскольку скорость вычислений ЧХ зависит от тактовой частоты конкретного процессора, количества ядер и операционной системы используемого компьютера, эти зависимости могут быть использованы для косвенной оценки затрат машинного времени.

Дальнейшие эксперименты показали возможность вычисления ЛЧХ любых гармоник тестовых динамических объектов с помощью предложенного ПГ-метода автоинтегрирования.

Заключение

Исследована работоспособность нового ПГ-метода автоинтегрирования для расчета амплитудно-фазовых частотных характеристик динамических объектов, регуляторов и систем управления, в котором процесс интегрирования на каждой из фиксированных частот продолжается до тех пор, пока сравниваемые параметры исследуемой и дополнительных гармоник периодического отклика динамического объекта на ВМС не станут достаточно постоянными. Показано, что в качестве критерия достаточности постоянства коэффициентов Фурье в методе автоинтегриро-

вания может быть использовано сравнение средних значений коэффициентов Фурье ИГ ПВС динамического объекта или следящей системы, получаемых на последнем периоде ВМС, со средними значениями этих же коэффициентов Фурье на предпоследнем периоде (вариант ПГ-метода автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье).

Новый ПГ-метод автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье для расчета ЧХ нелинейных динамических объектов повышает точность результатов расчетов по сравнению с традиционным МГ-методом автоинтегрирования при одинаковых заданных параметрах погрешностей вычислений, что позволяет более точно идентифицировать параметры нелинейных динамических объектов. Получены семейства более точных ЧХ первой, второй, третьей и последующих гармоник звена второго порядка с классическим сухим (кулоновским) трением для вариаций значений нормированной безразмерной силы сухого трения, позволяющих более точно идентифицировать такие объекты.

Исследованный метод является работоспособным, так как позволяет рассчитывать амплитудно-фазовые частотные характеристики существенно нелинейных динамических объектов в чистом виде с заданной погрешностью вычислений и за минимальное количество периодов интегрирования ВМС, определяющего затраты машинного времени. Вариант ПГ-метода автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье применим для расчета амплитудно-фазовых частотных характеристик динамических систем, содержащих существенно нелинейные объекты типа звена второго порядка с классическим сухим (кулоновым) трением с нелинейностью в виде разрыва первого рода. С помощью исследованного варианта ПГ-метода автоинтегрирования можно рассчитывать амплитудно-фазовые ЧХ как четных, так и нечетных гармоник динамических объектов и систем управления.

Библиографический список

1. Исследование переходных процессов втягивания типовых динамических звеньев в вынужденные гармонические колебания / О. Б. Белоногов, Д. С. Белицкий, М. Н. Жарков и др. // Ракетно-космическая техника. 1998. Сер. XII. Вып. 3–4. С. 245–258.

2. Методы расчета частотных характеристик систем управления вектором тяги ракетных двигателей / О. Б. Белоногов, Д. С. Белицкий, М. Н. Жарков и др. // Ракетно-космическая техника. 1998. Сер. XII. Вып. 3–4. С. 259–284.

3. *Белоногов О. Б.* Моногармонический метод автоинтегрирования с локальным осреднением коэффициентов Фурье для расчета частотных характеристик динамических объектов и систем управления // Вестн. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2013. № 4. С. 53–56.

4. *Белоногов О. Б.* Моногармонический метод автоинтегрирования с полным осреднением коэффициентов Фурье для расчета частотных характеристик динамических объектов и систем управления // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2013. № 4. С. 3–13.

5. *Белоногов О. Б.* Способ определения амплитудно-фазовой частотной характеристики динамического объекта: пат. 2499268 РФ / заявл. 19.04.2012; опубл. 20.11.2013. Бюл. № 32.

УДК 681.5

М. В. Бураков
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В статье рассматривается иерархическая организация нечеткого логического регулятора, позволяющая сократить количество управляющих правил. Двухуровневый контур управления содержит супервизор верхнего уровня и регуляторы нижнего уровня. Супервизор обеспечивает выполнение основной задачи управления, изменяя уровни активности регуляторов нижнего уровня, которые решают частные задачи. Вычислительные эксперименты с моделью перевернутого маятника подтверждают практическую значимость предлагаемой схемы управления.

Ключевые слова: *нечеткое логическое управление, супервизор, обратный маятник.*

M. V. Burakov
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

HIERARCHICAL FUZZY CONTROL

The article deals with the hierarchical organization of the fuzzy logic controller, which makes it possible to reduce the number of control rules. A two-level control loop contains a supervisor and lower level controls. The supervisor provides the execution of the main control task by changing the levels of activity of the lower level controllers that solve particular tasks. Computational experiments with the model of an inverted pendulum confirm the practical significance of the proposed control scheme.

Keywords: *fuzzy logical control, inverted pendulum.*

Основное достоинство нечетких логических регуляторов (НЛР) заключается в возможности описания нелинейного закона управления, который может обеспечить лучшие показатели качества, чем традиционные линейные регуляторы. Первые НЛР, примененные для управления динамическими объектами, использовали опыт оператора, управляющего сложным объектом [1, 2]. Экспертный опыт позволил обойтись без использования математического описания объекта управления.

Основу НЛР составляют управляющие правила, посылками которых является состояние объекта, а заключениями – сигнал управления. Для описания посылок и заключений правил используются лингвистические переменные (ЛП), состоящие из отдельных нечетких значений – термов. При управлении требуется описать все возможные вариации состояния, поэтому количество термов посылок непосредственно определяет количество правил N, а именно

$$N = \cdot\prod_{i=1}^{m} card\{T_i\},$$

где $card\{T_i\}$ – мощность терм-множества i-й посылки, m – количество посылок.

Экспоненциальный рост количества правил НЛР возможен при увеличении числа входных переменных. Например, если рассматривается НЛР ПИД-типа [3] и для описания каждой посылки используется 5 термов, то N оказывается равно 125.

Оператор не может оперировать с большим количеством правил, поэтому экспертный опыт неприменим при синтезе НЛР для большинства реальных объектов.

Универсальный подход к генерации правил НЛР обеспечивается при использовании следующих методов [4–6]:

– кластеризации экспериментальной информации, в том числе – с помощью нейронечетких систем;

– анализа фазового пространства объекта для выявления действия отдельных правил;

– эволюционной оптимизации базы правил на основе экспериментов с объектом или его моделью.

Упрощение структуры базы правил НЛР также может быть достигнуто при ее иерархической организации из нескольких уровней [7, 8].

Основной принцип нечеткого иерархического управления (НИУ) заключается в следующем [7]: на верхнем уровне рассматривается наиболее значимая для управления переменная, затем выходная переменная этого уровня вступает во взаимодействие с менее значимой переменной следующего уровня, уточняющей состояние объекта и т. д. (рис. 1). При этом на одном уровне может быть несколько групп переменных (рис. 2).

Общая идея НИУ допускает различные воплощения при выборе конкретных способов взаимодействия между уровнями иерархии и способов описания правил.

Рассмотрим в качестве объекта для исследования методов НИУ перевернутый маятник на тележке (рис. 3). Этот неустойчивый нелинейный объект является многосвязным, т. к. имеет две выходные переменные и один управляющий

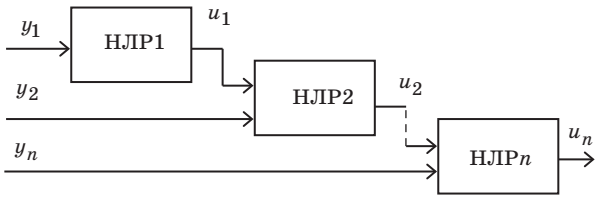


Рис. 1. Иерархическая организация базы правил НЛР

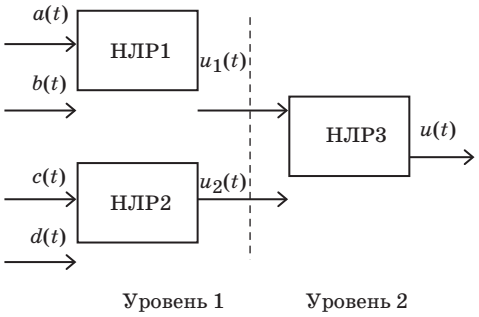


Рис. 2. Группировка правил на одном уровне

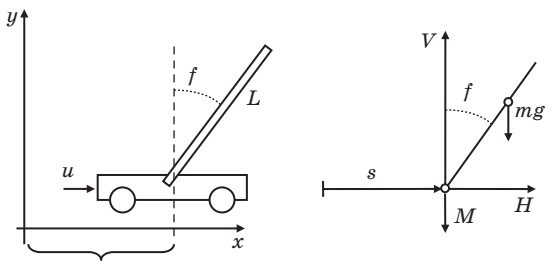


Рис. 3. Перевернутый маятник на тележке

вход. Задача управления состоит в приведении тележки в точку начала координат при нулевом отклонении маятника от вертикали.

В работе [9] для организации НИУ используются метазнания о процессе управления, а в [10] для настройки правил применяется генетический алгоритм. Особенность подхода к организации НИУ, который излагается в данной работе, заключается в отказе от дополнительных механизмов в виде метаправил или оптимизационных процедур. Регулятор настраивается после ограниченного количества опытов с объектом (или его моделью), на разных уровнях НИУ используются стандартные нечеткие законы управления.

На рис. 3 использованы обозначения: M – масса тележки (кг); m – масса маятника (кг); L – длина маятника (м); f – угол отклонения маятника от вертикальной оси (рад); s – отклонение тележки от начала координат (м); u – сила, толкающая тележку (Н); V и H – вертикальная и горизонтальная силы реакции опоры у точки крепления маятника на тележке.

Динамику маятника на тележке описывают нелинейные дифференциальные уравнения [11]:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2}{dt^2}\left(s(t)+L\sin(f(t))\right)=H(t), \\ m\dfrac{d^2}{dt^2}\left(L\cos(f(t))\right)=V(t)-mg, \\ J\dfrac{d^2f(t)}{dt^2}=LV(t)\sin(f(t))-LH(t)\cos(f(t)), \\ M\dfrac{d^2s(t)}{dt^2}=u(t)-H(t)-F\dfrac{ds(t)}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где F – коэффициент силы трения при движении маятника, J – момент инерции, вычисляемый по формуле

$$J=\frac{mL^2}{3}.$$

При точно известных параметрах математической модели (1) можно добиться высокого качества переходных процессов методом модального управления [11] или путем эволюционной оптимизации параметров регулятора [6].

В соответствии с принятым подходом будем считать модель «черным ящиком», внутренняя структура которого неизвестна. Можно лишь получить отклик модели на заданный управляющий сигнал (рис. 4).

Как показывает рис. 4, при традиционном подходе к конструированию НЛР и при пяти термах каждой входной ЛП потребуется описать 625 правил управления, что совершенно неприемлемо.

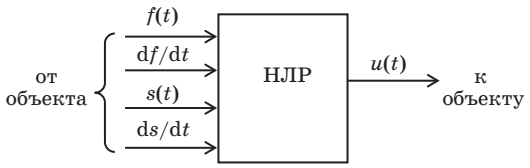


Рис. 4. Вход-выходная информация нечеткого регулятора

Предлагаемый подход заключается в следующем:

1. Для каждой из двух управляемых переменных рассматривается свой регулятор – $НЛР_1$ и $НЛР_2$. Каждый регулятор использует стандартную таблицу лингвистических правил (ТЛП) [12].

2. Выделяется главная управляемая переменная, в данном случае – отклонение маятника *f*. Сигнал $НЛР_1$ доминирует по отношению к $НЛР_2$ до тех пор, пока ошибка отклонения маятника не станет малой.

3. Для описания иерархии регуляторов вводится $НЛР_3$, которая анализирует качество решения основной задачи и определяет β-уровень активизации $НЛР_1$, так что активность $НЛР_2$ становится равна 1 – β.

Структуру НИУ иллюстрирует рис. 5.

Стандартная ТЛП, используемая всеми $НЛР_1$ и $НЛР_2$, представлена на рис. 6 (где *e** обозначает отклонение от номинального значения, а «Н», «ПМ», «ОБ» – лингвистические метки «нулевое», «положительное маленькое», «отрицательное большое» и т. д.).

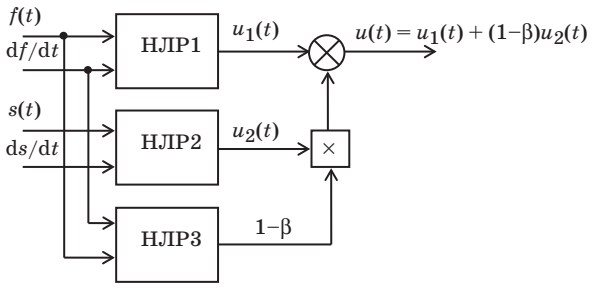


Рис. 5. Структура иерархического нечеткого регулятора

Таблица правил		(de/dt)*				
		ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
e*	ОБ	ОБ	ОБ	ОМ	ОМ	Н
	ОМ	ОБ	ОМ	ОМ	Н	ПМ
	Н	ОМ	ОМ	Н	ПМ	ПМ
	ПМ	ОМ	Н	ПМ	ПМ	ПБ
	ПБ	Н	ПМ	ПМ	ПБ	ПБ

u*

Рис. 6. Описание управляющих правил $НЛР_1$ и $НЛР_2$

На рис. 7 показана управляющая поверхность $НЛР_1$ и $НЛР_2$.

Выход регулятора нормализован к диапазону [–1; 1], поэтому для подачи на объект управления требуется выбрать масштабирующий коэффициент. Это единственный настраиваемый параметр регулятора.

Таблица лингвистических правил и управляющая поверхность $НЛР_3$ приведены на рис. 8 и 9.

Для описания β термы ЛП с метками «М», «Б», «М1» и т. д. равномерно распределяются по базовой шкале в диапазоне [0; 1].

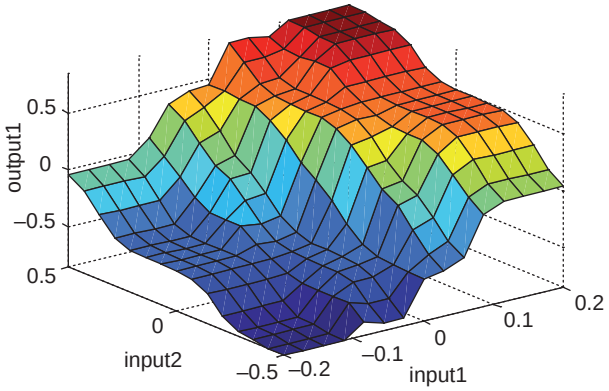


Рис. 7. Графическое описание закона управления $НЛР_1$ и $НЛР_2$

Таблица правил		(df/dt)*				
		ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
f*	ОБ	Б	$С_1$	С	$М_1$	М
	ОМ	$С_1$	С	$М_1$	М	$М_1$
	Н	С	$М_1$	М	$М_1$	С
	ПМ	$М_1$	М	$М_1$	С	$С_1$
	ПБ	М	$М_1$	С	$С_1$	Б

β*

Рис. 8. Описание управляющих правил $НЛР_1$ и $НЛР_2$

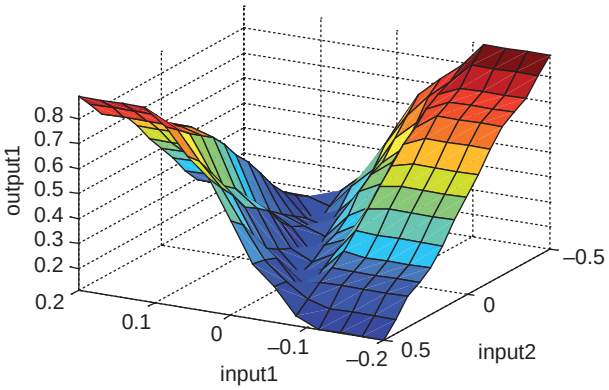


Рис. 9. Графическое описание закона управления $НЛР_3$

На рис. 10 представлен переходный процесс в системе при начальном отклонении маятника на 0,2 рад и тележки – на –0,25 м. На рис. 11 показан сигнал управления, вырабатываемый иерархическим НЛР.

На рис. 12 показаны сигналы, вырабатываемые отдельными НЛР, а на рис. 13 – согласующий сигнал.

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенная структура иерархического нечеткого регулятора (рис. 5) отличается простотой, она может быть обобщена для объектов с одним входом и тремя и более управляемыми координатами.

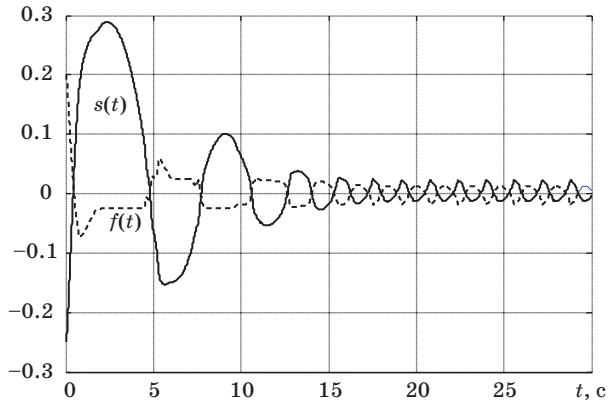


Рис. 10. Переходные процессы в системе маятник-тележка

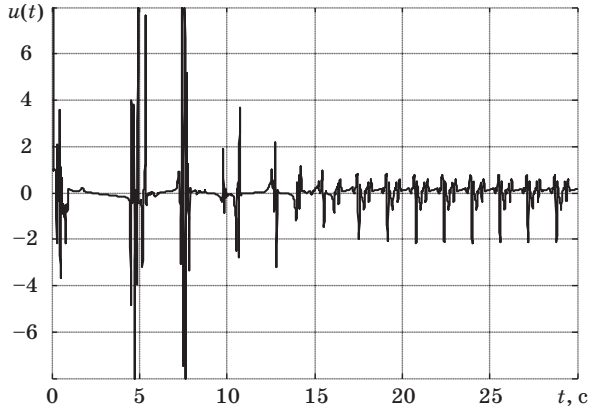


Рис. 11. Управляющее воздействие, приложенное к тележке

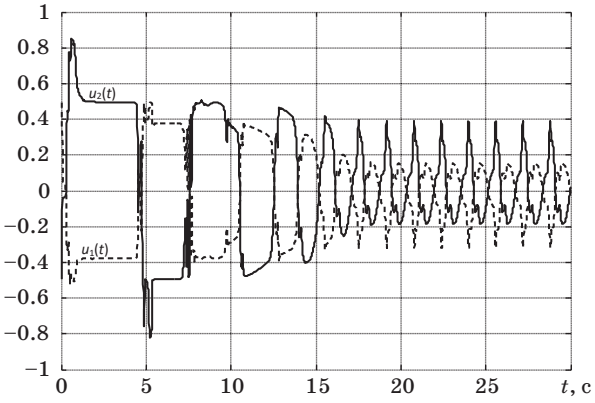


Рис. 12. Управляющее воздействие $НЛР_1$ и $НЛР_2$

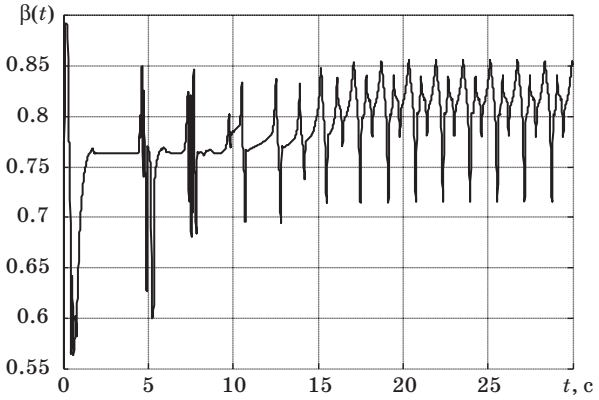


Рис. 13. Сигнал согласования β

2. Переходные процессы, приведенные на рис. 10, показывают, что предлагаемый подход обеспечивает удовлетворительное качество управления – установившиеся колебания маятника составляют порядка ±0,5 град при отклонениях тележки ±0,02 м.

3. Основное достоинство предлагаемого подхода заключается в том, что разработка регулятора не требует знания математического описания объекта. Регулятор использует стандартные ТЛП и содержит лишь один настраиваемый параметр – масштабирующий коэффициент, который может быть выбран после небольшого количества опытов с объектом или его моделью, выступающей в качестве «черного ящика».

Библиографический список

1. *Mamdani E. H., Assilian S.* An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. № 1. P. 1–13.

2. *Holmblad L. P., Osregaard J. J.* Control of Cement Kiln by Fuzzy Logic. In Approximate Reasoning in Decision Analysis (Gupta M. M. and Sanchez E. Eds.): Amsterdam, N. Y., Oxford, 1982. P. 389–400.

3. *Бураков М. В., Кирпичников А. П.* Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // Вестн. Казанск. техн. ун-та. 2015. Т. 18. № 4. С. 242–244.

4. Бураков, М. В. Нечеткие регуляторы. СПб.: ГУАП, 2010. 237 с.

5. *Бураков М. В., Брунов М. С.* Структурная идентификация нечеткой модели // Тр. СПИИРАН, 2014. Вып. 3 (34). С. 232–246.

6. *Бураков М. В., Коновалов А. С., Яковец О. Б.* Эволюционный синтез нечетких регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 28–33.

7. *Raju G. V. S., Zhou J., Kisner R. A.* Hierarchical Fuzzy Control // International Journal of Control. 1991. 54 (5). P. 1201–1216.

8. *Yager R. R.* On a Hierarchical Structure for Fuzzy Modeling and Control, IEEE Trans. Syst. Man Cybernet., 1993. Vol. 23. P. 1189–1197.

9. *Magdalena L., Monasterio F., Rivero C.* Hierarchical Decomposition of Fuzzy Controllers Based on Meta-Knowledge // Mathware & Soft Computing. 1998. Vol. 5. P. 291–304.

10. Shill P. C., Amin M. F., Murase K. Design of a Self-Tuning Hierarchical Fuzzy Logic Controller for Nonlinear Swing Up and Stabilizing Control of Inverted Pendulum // WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Australia, 2012. P. 1035–1042.

11. *Квакернаак Х., Сиван Р.* Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977. 650 с.

12. *MacVicar-Whelan P. J.* Fuzzy Sets for Man-Machine Interaction // International Journal of Man-Machine Studies. 1976. Vol. 8. P. 687–697.

УДК 681.5

М. В. Бураков
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РЕШЕНИЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА

В статье представлен нейросетевой подход к решению систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений. Рассмотрены способы формирования параметров нейронной сети Хопфилда и энергетических функций, минимизирующих ошибку выхода. Приводятся несколько иллюстративных примеров, чтобы показать возможности предлагаемого метода.

Ключевые слова: *нейронная сеть Хопфилда, оптимизация, алгебраические уравнения, энергетическая функция.*

M. V. Burakov
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SOLVING OF NONLINEAR EQUATION WITH HOPFIELD NEURAL NETWORK

In this paper we present a neural network approach to solving the system of linear and nonlinear algebraic equations. The methods of forming parameters of the Hopfield neural network and energy functions minimizing the output error are considered. Several illustrative examples are given to show the possibilities of the proposed method.

Keywords: *Hopfield network, optimization, algebraic equations, energy function.*

Введение

Нейронные сети (НС) Хопфилда [1, 2] – это однослойные рекуррентные динамические сети, то есть сети с одним слоем нейронов, где выходы каждого из них подаются обратно на входы других. Такие НС находят применение в различных областях науки и техники [3–5], в том числе – при обработке изображений и речи, комбинаторных задачах, обработке сигналов и т. д. Одним из направлений использования НС Хопфилда является решение линейных уравнений и их систем [6], а также задач математической физики [7].

В данной работе показано, что НС Хопфилда могут быть единообразно использованы как для решения систем линейных, так и нелинейных уравнений.

Описание нейронной сети Хопфилда

Структура НС Хопфилда представлена на рис. 1.

Выход j-го искусственного нейрона (ИН$_j$) описывается уравнениями

$$\begin{cases} \dfrac{dx_i}{dt} = \sum\limits_j w_{ij} u_j - I_i; \\ u_j = \varphi(x_j) = \tanh\left(\dfrac{x_j}{\beta}\right), \end{cases} \qquad (1)$$

где β регулирует наклон активационной функции, I – смещение нейрона.

Для решения системы уравнений с помощью сети Хопфилда требуется описать энергетическую функцию

$$E(X) = \sum_{i=1}^{n} \left(f_i(x_1, x_2, \ldots x_n) - k_i \right)^2, \qquad (2)$$

где X – вектор коэффициентов системы из n уравнений, f_i и k_i – левая и правая (константа) части i-го уравнения.

Очевидно, что (1) описывает ошибку выхода НС, и $E \geq 0$ во всех точках, кроме точки равновесия.

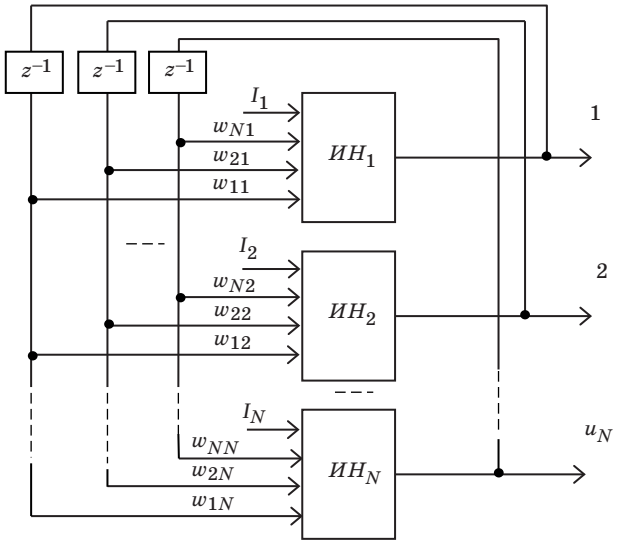


Рис. 1. Структура сети Хопфилда

Динамика НС должна быть реализована таким образом, чтобы функция (2) стала функцией Ляпунова, т. е. имела отрицательную производную.

$$\frac{dE(X)}{dt} = \frac{\partial E(X)}{\partial x_i}\frac{dx_i}{dt}, \qquad i = \overline{1,n}. \tag{3}$$

Пусть динамика НС определяется выражением

$$\frac{du_j}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial x_j}. \tag{4}$$

Тогда из (3) и (4) следует

$$\frac{dE(x_j)}{dt} = -\frac{du_j}{dt}\frac{dx_i}{dt}, \qquad j = \overline{1,n}. \tag{5}$$

Согласно (1),

$$u_j = \varphi(x_j) \quad \Rightarrow \quad x_j = \varphi^{-1}(u_j).$$

Тогда

$$\frac{dx_j}{dt} = \frac{\partial \varphi^{-1}(u_j)}{\partial u_j}\frac{\partial u_j}{dt}, \qquad j = \overline{1,n}. \tag{6}$$

Подставляя (6) в (5), получаем

$$\frac{dE(X)}{dt} = -\left(\frac{du_j}{dt}\right)^2 \frac{\partial \varphi^{-1}(u_j)}{\partial u_j}. \tag{7}$$

Значение производной (7) всегда отрицательно, если активационная функция φ выбрана таким образом, что частная производная всегда положительна. Это условие обеспечивается для непрерывно дифференцируемой монотонно растущей функции (линейная функция, гиперболический тангенс и т. п.).

Таким образом, при условии (4) функция (2) является функцией Ляпунова, и ошибка выхода НС должна уменьшаться во времени.

Решение систем линейных уравнений

Рассмотрим систему линейных уравнений вида

$$\begin{cases} A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 - A_{14} = 0, \\ A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 - A_{24} = 0, \\ A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}X_3 - A_{34} = 0. \end{cases}$$

Здесь может быть использована энергетическая функция вида

$$E = \sum_{i=1}^{3}\left(A_{i1}X_1 + A_{i2}X_2 + A_{i3}X_3 - A_{i4}\right)^2.$$

Тогда динамику сети описывают выражения

$$\begin{cases} \dfrac{du_1}{dt} = -\dfrac{\partial E}{\partial X_1} = \\ = -2(A_{11}^2X_1 + A_{11}A_{12}X_2 + A_{11}A_{13}X_3 + A_{11}A_{14}); \\ \dfrac{du_2}{dt} = -\dfrac{\partial E}{\partial X_2} = \\ = -2(A_{22}A_{21}X_1 + A_{22}^2X_2 + A_{22}A_{23}X_3 + A_{22}A_{24}); \\ \dfrac{du_3}{dt} = -\dfrac{\partial E}{\partial X_3} = \\ = -2(A_{33}A_{31}X_1 + A_{33}A_{32}X_2 + A_{33}^2X_3 + A_{33}A_{34}). \end{cases}$$

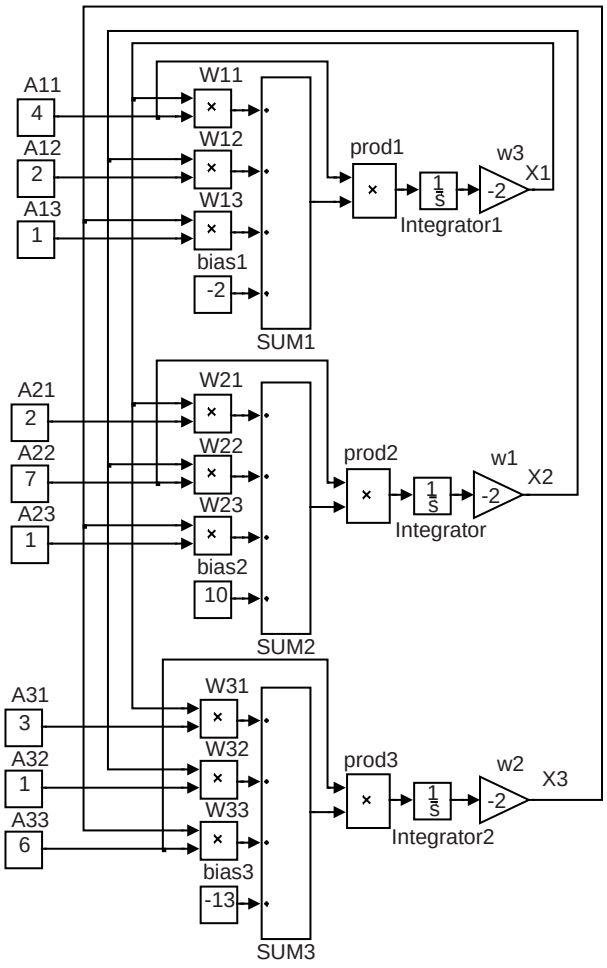


Рис. 2. Нейронная сеть Хопфилда для системы линейных уравнений

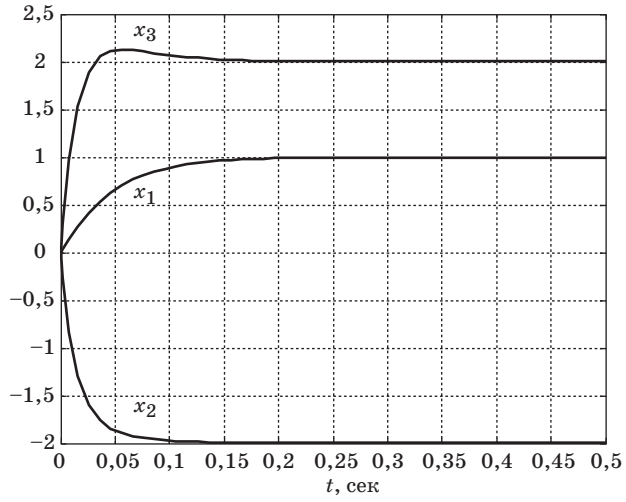


Рис. 3. Переходные процессы при решении системы линейных уравнений

Матрица весов НС Хопфилда и вектор смещений имеют вид

$$W=\begin{bmatrix} A_{11}^2 & A_{11}A_{12} & A_{11}A_{13} \\ A_{22}A_{21} & A_{22}^2 & A_{22}A_{23} \\ A_{33}A_{31} & A_{33}A_{32} & A_{33}^2 \end{bmatrix};\ bias=\begin{bmatrix} A_{11}A_{14} \\ A_{22}A_{24} \\ A_{33}A_{34} \end{bmatrix}.$$

Блок-схема НС представлена на рис. 2.

Рассмотрим пример решения линейной системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 \\ 2 & 7 & 1 \\ 3 & 1 & 6 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 2 \\ -10 \\ 13 \end{bmatrix}.$$

Переходные процессы на выходе динамической НС представлены на рис. 3. Установившиеся значения сходятся к решению $X = [1; 2; -2]$.

Решение систем нелинейных уравнений

Аналогичный подход можно использовать и для решения системы нелинейных алгебраических уравнений вида

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \ldots x_n) = k_1; \\ f_2(x_1, x_2, \ldots x_n) = k_2; \\ \ldots \\ f_n(x_1, x_2, \ldots x_n) = k_n, \end{cases}$$

где k_i – заданные константы, f_i – нелинейные зависимости.

Рассмотрим, например, систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4 = 0, \\ B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_1X_2 + B_4 = 0. \end{cases}$$

Здесь может быть использована энергетическая функция вида

$$E=\Big((A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4)^2 + \\ +(B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_1X_2 + B_4)^2\Big).$$

Динамику сети описывают выражения

$$\frac{du_1}{dt}=-\frac{\partial E}{\partial X_1}= \\ =-\{2(A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4)(A_1 + A_3X_2) + \\ +2(B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_1X_2 + B_4)(B_1 + B_3X_2)\};$$

$$\frac{du_2}{dt}=-\frac{\partial E}{\partial X_2}= \\ =-\{2(A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4)(A_2 + A_3X_1) + \\ +2(B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_1X_2 + B_4)(B_2 + B_3X_1)\}.$$

Откуда следует:

$$\frac{du_1}{dt}=-\Big(W_1X_1 + W_2X_2 + W_3X_1X_2 + \\ +W_4X_2^2 + W_5X_1X_2^2 + bias1\Big);$$

$$\frac{du_2}{dt}=-\Big(V_1X_1 + V_2X_2 + V_3X_1X_2 + V_4X_2^2 + \\ V_5X_1X_2^2 + bias2\Big),$$

где весовые функции и смещения нейронов вычисляются по формулам:

$$W_1 = -2(A_1^2 + B_1^2);$$

$$W_2 = -2(A_1A_2 + A_3A_4 + B_1B_2 + B_3B_4);$$

$$W_3 = -2(2A_1A_3 + 2B_1B_3);\ \ W_4 = -2(A_2A_3 + B_2B_3);$$

$$W_5 = -2(A_3^2 + B_3^2);$$

$$bias1 = -2(A_1A_4 + B_1B_4);$$

$$V_1 = -2(A_1A_2 + A_3A_4 + B_1B_2 + B_3B_4);$$

$$V_2 = -2(A_2^2 + B_2^2);\ \ V_3 = -2(2A_2A_3 + 2B_2B_3);$$

$$V_4 = -2(A_1A_3 + B_1B_3);\ \ V_5 = -2(A_3^2 + B_3^2);$$

$$bias2 = -2(A_2A_4 + B_2B_4).$$

На рис. 4 приведено описание сети Хопфилда для решения системы двух нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} X_1 + 2X_2 + 3X_1X_2 + 4 = 0, \\ 5X_1 + 3X_2 + X_1X_2 + 2 = 0. \end{cases}$$

На рис. 5 показано решение, полученное с помощью НС ($X_1 = 0{,}5$; $X_2 = -1{,}286$).

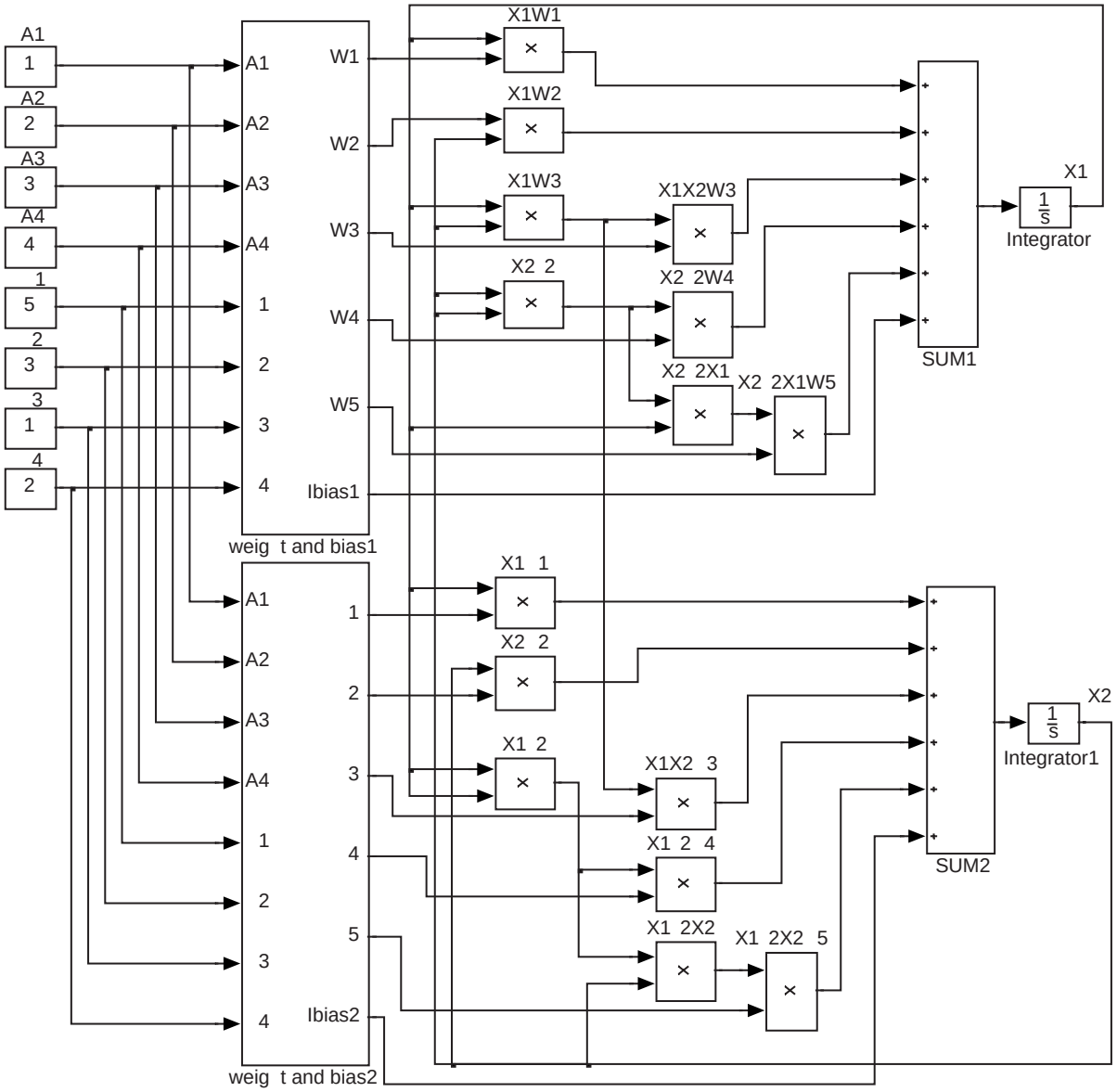


Рис. 4. Блок-схема решения системы нелинейных уравнений

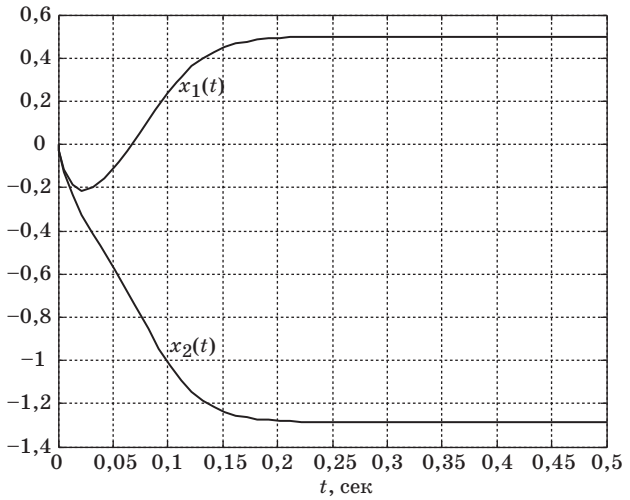


Рис. 5. Динамика выхода НС Хопфилда при решении системы двух нелинейных уравнений

Заключение

Нейронные сети Хопфилда являются достаточно универсальным инструментом оптимизации. Основная трудность их использования для конкретной задачи заключается в построении энергетической функции (функции Ляпунова), которая должна быть минимизирована в процессе изменения состояний сети.

Как было показано, построение энергетической функции при решении систем линейных и нелинейных уравнений допускает простое описание. При этом могут быть обоснованы условия устойчивости динамической НС. Количество нейронов однослойной НС Хопфилда соответствует порядку системы уравнений, весовые коэффициенты межнейронных связей и смещения нейронов рассчитываются по коэффициентам системы уравнений.

Следует заметить, что НС выдает только решения, которые описываются действительными числами, но это приемлемо для многих практических задач. Например, в задаче идентификации линейной системы решением служат коэффициенты разностной модели, наилучшим образом удовлетворяющие опытным данным. Использование НС Хопфилда здесь может служить альтернативой методу наименьших квадратов.

Библиографический список

1. *Hopfield J. J.* Neural Networks and Phisical Systems with Emergent Collective Computational Abilities // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1982. Vol. 79. P. 2554–2558.

2. *Hopfield J., Tank D.* Neural Computation of Decisions in Optimization Problems // Biological Cybernetics. 1985. Vol. 52. P. 141–152.

3. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.

4. *Хайкин С.* Нейронные сети. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.

5. *Бураков М. В.* Нейронные сети и нейроконтроллеры. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.

6. *Yi C., Zhang Y.* Analogue Recurrent Neural Network for Linear Algebraic Equation Solving // Electronics Letters. Vol. 44. Nr. 18. 2008. P. 1078–1080.

7. *Бойков И. В., Баулина О. А.* Приближенное решение эллиптических уравнений на нейронных сетях Хопфилда // Физико-математические науки. Математика. № 1 (29). 2014. С. 39–53.

УДК 681.5

М. В. Бураков[1]
кандидат технических наук, доцент

М. С. Брунов[2]
старший преподаватель
[1,2]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

НЕЧЕТКО-МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Статья посвящена разработке нечетко-модального регулятора для системы управления положением шарика на планке. Этот нелинейный динамический объект часто рассматривается при разработке различных стратегий управления. Одним из вариантов здесь является использование модального управления на основе линеаризованной модели системы. Однако особенность линейного регулятора заключается в том, что при его расчете требуется точно знать параметры системы. Предлагаемый адаптивный алгоритм управления основан на использовании множества модальных законов управления, синтезированных для шариков разной массы. Сигналы модальных регуляторов согласуются с помощью схемы нечеткого логического вывода, использующей априорное лингвистическое описание состояний системы. Результаты моделирования показывают, что нечетко-модальное управление обеспечивает хорошее качество переходного процесса при неизвестной массе шарика из заданного диапазона.

Ключевые слова: *нелинейная система, шарик на планке, нечеткая логика, модальное управление.*

M. V. Burakov[1]
PhD, Tech., Associate Professor

M. S. Brunov[2]
Senior Lecturer
[1,2]*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FUZZY-MODAL CONTROL OF NONLINEAR DYNAMIC PLANT

The article is devoted to the development of a fuzzy-modal controller for the ball-beam position control system. This nonlinear dynamic plant is often considered when developing various control strategies. One option here is to use modal controls based on the linearized system model. However, the peculiarity of the linear controller is that the duration of the transient process does not depend on the initial state of the system. The proposed nonlinear control algorithm is based on the use of a set of modal control laws synthesized for different eigenvalues of a closed loop system. The signals of the modal controllers are matched by a fuzzy inference circuit using an a priori linguistic description of the states of the system. The simulation results show that fuzzy-modal control provides a transient time proportional to the initial deviation of the system.

Keywords: *nonlinear system, ball-beam, fuzzy logic, modal control.*

Введение

Для современного этапа развития теории автоматического управления (ТАУ) характерно взаимодействие методов интеллектуального управления и классических разделов ТАУ. Одним из вариантов такого взаимодействия является нечетко-модальное управление, рассмотренное в данной работе.

Моделирование системы «шарик на планке» имеет большое практическое значение, поскольку переходные процессы здесь подобны динами-

ке самолета при взлете и посадке, а также при движении в турбулентной зоне [1, 2].

Метод пространства состояний является эффективным инструментом проектирования, обеспечивающим высокую точность систем управления [3, 4]. Однако синтез модального закона управления требует точного указания параметров системы, в частности – массы шарика. Для системы, работающей в условиях неопределенности, модальный синтез напрямую неприменим, что стимулирует привлечение методов нечеткого [5, 6] и нейросетевого [7] управления.

Нечеткая логика позволяет управлять сложными объектами, используя нелинейные алгоритмы [8, 9]. Но задача конструирования нечетких правил не является строго формализованной, а точность управления может быть недостаточно высокой.

В данной работе исследуется вариант организации управления системой «шарик на планке» с переменной массой шарика, основанный на использовании множества модальных регуляторов, сигналы которых согласуются с помощью схемы нечеткого логического вывода. Такой вариант имеет сходство с нечетким логическим регулятором (НЛР) типа *Takagi – Sugeno* [10, 11], в котором множество правил соответствует множеству линейных моделей, каждая из которых описывает локальную область фазового пространства объекта. Конструирование НЛР типа *Takagi – Sugeno* для нелинейных объектов было рассмотрено в [12, 13], где в качестве локальных использовались ПИД-регуляторы. Преимущество модального управления заключается в возможности аналитического расчета параметров, позволяющего поместить полюса замкнутой системы в заранее выбранное положение, обеспечив тем самым нужные характеристики переходных процессов.

Математическая модель объекта управления

Рассмотрим математическую модель объекта управления. Введем обозначения: θ – угол наклона желоба, m – масса шарика, r – радиус шарика, p – координата вдоль оси желоба, l – длина планки, J_1 и J_2 – моменты инерции планки и шарика, τ – управляющий момент.

Схема сил, действующих в системе, показана на рис. 1.

Нелинейная модель динамики системы получена, например, в [11] на основании уравнений Лагранжа, она имеет вид

$$\begin{cases} \left(mp^2 + J_1\right)\ddot{\theta} + 2mp\dot{p}\dot{\theta} + mgp\cos\theta = \tau, \\ \left(\dfrac{J_2}{r^2} + m\right)\ddot{p} + mg\sin\theta - mp\dot{\theta}^2. \end{cases} \quad (1)$$

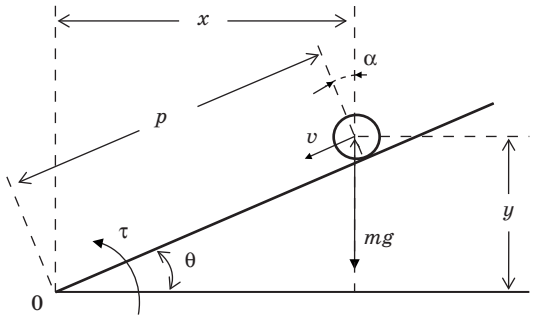


Рис. 1. Схематическое изображение системы планка-шарик

Введем переменные состояния:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}.$$

Тогда из (1) следует

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \dfrac{m\left(x_1 x_4^2 - g\sin x_3\right)}{\dfrac{J_2}{r^2} + m} \\ x_4 \\ \dfrac{-2mx_1x_2x_4 - mgx_1\cos x_3 + \tau}{mx_1^2 + J_1} \end{bmatrix} = = F(X,\tau) = \begin{bmatrix} f_1(X,\tau) \\ f_2(X,\tau) \\ f_3(X,\tau) \\ f_4(X,\tau) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Рассмотрим линеаризацию (2):

$$A = \frac{\partial F(X,\tau)}{\partial X} = = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{mx_4^2}{\dfrac{J_2}{r^2} + m} & 0 & \dfrac{-mg\cos x_3}{\dfrac{J_2}{r^2} + m} & \dfrac{2mx_1x_4}{\dfrac{J_2}{r^2} + m} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dfrac{\partial f_4}{\partial x_1} & -\dfrac{2mx_1x_4}{mx_1^2 + J_1} & \dfrac{mgx_1\sin x_3}{mx_1^2 + J_1} & -\dfrac{2mx_1x_2}{mx_1^2 + J_1} \end{bmatrix},$$

где

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_1} = \Big(\left(-2mx_2x_4 - mg\cos x_3\right)\left(mx_1^2 + J_1\right) - \left(-2mx_1x_2x_4 - mgx_1\cos x_3 + \tau\right)\Big) \Big/ \left(mx_1^2 + J_1\right)^2.$$

$$B = \frac{\partial F(X,\tau)}{\partial \tau} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dfrac{1}{mx_1^2 + J_1} \end{bmatrix}.$$

Пусть рабочая точка имеет координаты состояния $X_0 = [p_0\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$, тогда из (2) следует

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{-mg}{\dfrac{J_2}{r^2} + m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dfrac{-mg}{mp_0^2 + J_1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dfrac{1}{mp_0^2 + J_1} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}; \qquad (3)$$

Таким образом, получено линеаризованное описание динамики системы, которое зависит от рабочей точки по длине планки.

Модальное управление шариком на планке

Рассмотрим систему с параметрами: $m = 0{,}1$ кг, $r = 0{,}015$ м, $J_1 = 0{,}00001$ кг/м^2, $J_2 = 0{,}025$ кг/м^2 и рабочей точкой $X_0 = [1\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$, тогда, подставляя в (3), имеем

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6{,}8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -39{,}2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 40 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$

Выбираем положение полюсов замкнутой системы: $P = [-3\ -3\ -3\ -3]$, тогда по формуле Аккермана можно получить вектор коэффициентов обратных связей $K = [-1{,}28;\ -0{,}4;\ 1{,}35;\ 0{,}3]$.

На рис. 2 представлена блок-схема моделирования системы управления, на рис. 3 и 4 – пере-

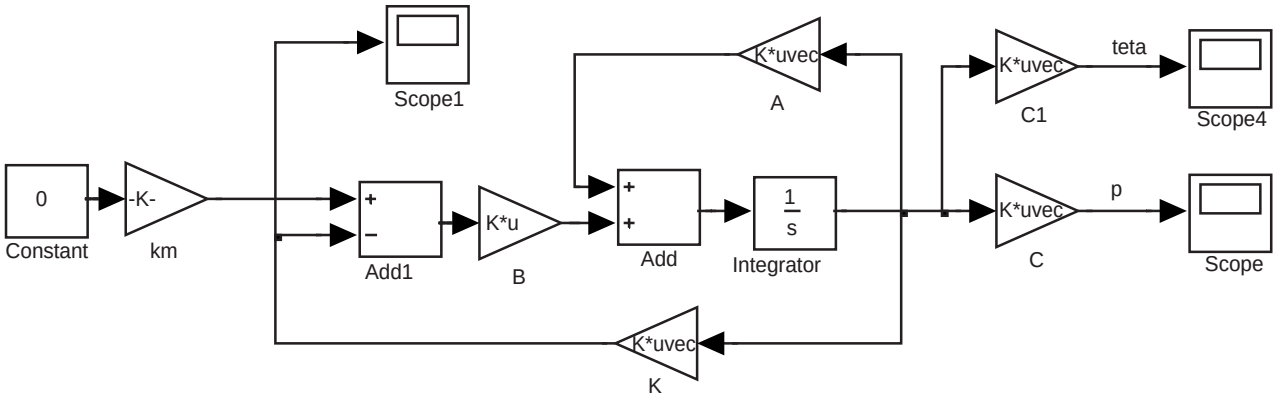


Рис. 2. Схема модального управления в Simulink MATLAB

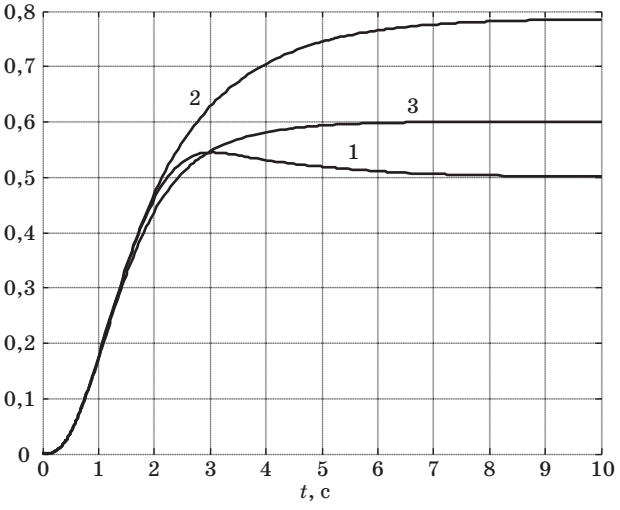


Рис. 3. Переходные процессы по положению при различных массах шарика: 1 – номинальная масса; 2 – увеличенная вдвое; 3 – уменьшенная вдвое

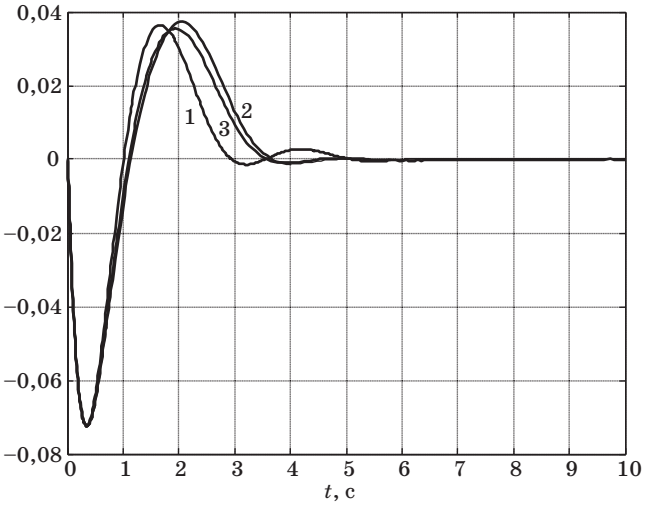


Рис. 4. Переходные процессы по наклону планки при различных массах шарика

ходные процессы при различных массах шарика для $p^* = 0{,}5$ м.

Как показывает рис. 3, при изменении массы шарика возникает значительная статическая ошибка.

Структура нечетко-модального регулятора

Использование НЛР *Takagi – Sugeno* предполагает, что нечеткий закон управления описывается совокупностью правил, в которых заключение является некоторой аналитической зависимостью от входных переменных:

$$\text{Если } Y(t) = C_i(X), \text{ то } u_i = f_i(X),$$

где Y – вектор выхода объекта, C – нечеткое множество, f – функция, обычно линейная, X – вектор состояния.

В рассматриваемой задаче

$$u_i = K_i X(t) = k_1^i p(t) + k_2^i \dot{p}(t) + k_3^i \theta(t) + k_4^i \dot{\theta}(t), \quad i = \overline{1,5}.$$

Нечеткое множество C описывает в общем случае некоторую область пространства состояний объекта, поэтому оно должно быть определено в 4-мерном пространстве: $C_i = C_i(p, \dot{p}, \theta, \dot{\theta})$.

Рассмотрим упрощенный вариант, когда $C_i = E_i(\Delta p(t))$, где E описывает отклонение положения шарика от положения, заданного эталонной моделью (пример на рис. 5, где E_i – нечеткие множества, соответствующие области действия отдельных регуляторов, μ – степень принадлежности, Δp – расстояние между текущей точкой и уставкой).

Выход нечеткой системы в каждый момент времени рассчитывается по формуле

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mu_{Ti}(p(t)) u_i}{\sum_{i=1}^{N} \mu_{Ti}(p(t))} = w_1 u_1 + w_2 u_2 + \ldots + w_N u_N, \quad (3)$$

где $\mu_{Ti}(\Delta p(t))$ – степень принадлежности входного значения к i-й нечеткой области; w_i – весовой коэффициент i-го нечеткого регулятора.

Как показывает (3), выход НЛР здесь является взвешенной суммой выходов регуляторов, синтезированных при различной массе шарика. Структура НЛР представлена на рис. 6, где МР – модальный регулятор, p^* – заданное значение (уставка).

Таким образом, каждый локальный регулятор отвечает за свой диапазон параметров шарика. Области действия регуляторов перекрываются, поскольку для их описания используются нечеткие множества.

Как показал вычислительный эксперимент, при управлении выгодно использовать не ошибку положения шарика $\Delta p(t)$, а ее функцию, представляющую собой сигнал ПИД-регулятора:

$$E(t) = k_1 \Delta p(t) + k_2 \frac{dp(t)}{dt} + k_3 \int \Delta p(t) dt.$$

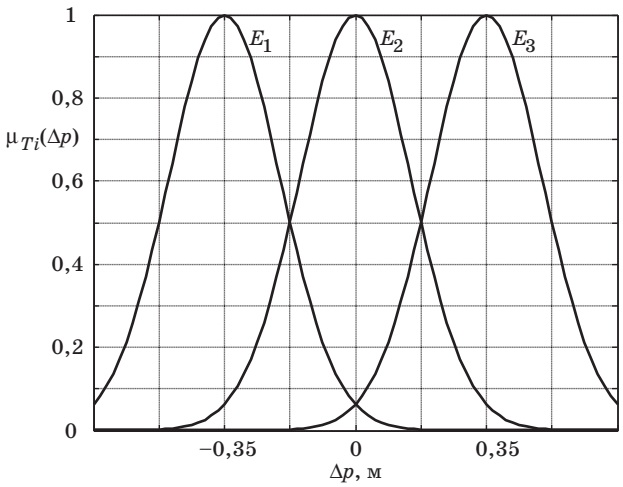


Рис. 5. Вариант описания областей активности регуляторов

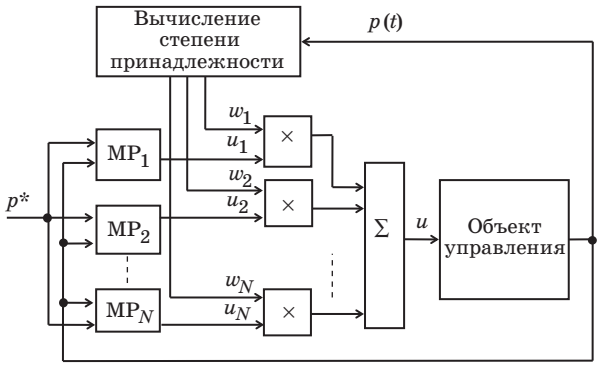


Рис. 6. Структура нечеткого логического регулятора

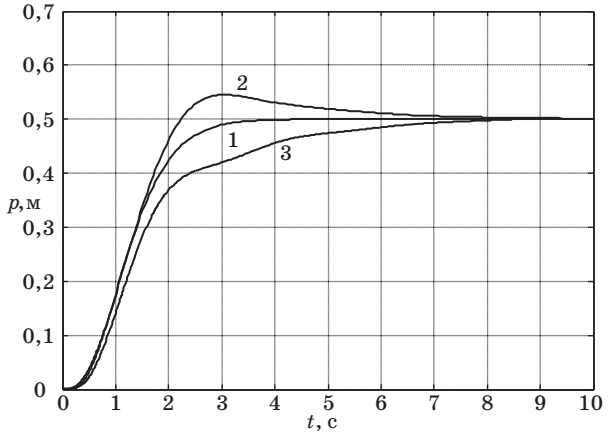


Рис. 7. Переходные процессы под управлением нечетко-модального регулятора: 1 – номинальная масса; 2 – увеличенная вдвое; 3 – уменьшенная вдвое

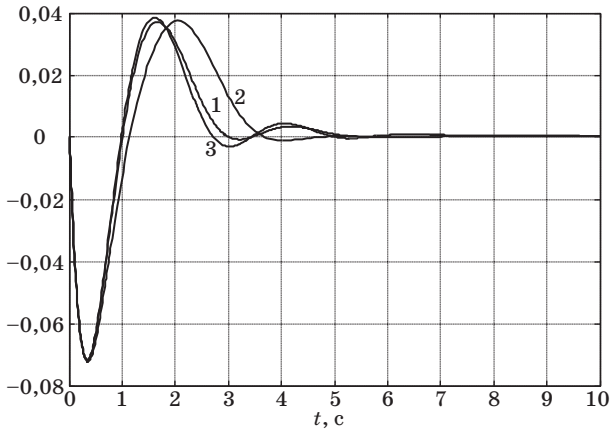


Рис. 8. Переходные процессы по наклону планки под управлением нечетко-модального регулятора при различных массах шарика

Коэффициенты k_1, k_2, k_3 могут быть найдены, например, с помощью генетической оптимизации.

На рис. 7 и 8 приведен пример моделирования работы нечетко-модального регулятора при различных массах шарика. В отличие от линейного модального регулятора (рис. 3), здесь время переходного процесса не изменяется, статическая ошибка близка к нулю, а перерегулирование незначительно.

Заключение

В статье предложена структура нечетко-модального регулятора для управления динамическим объектом с переменными параметрами.

Предлагаемая схема позволяет получить следующие возможности:

1. Выполнять аналитический расчет локальных линейных регуляторов по заданным показателям качества.

2. Использовать ограниченное количество локальных регуляторов за счет согласования их сигналов с помощью схемы нечеткого вывода.

3. Устранить недостаток линейного закона управления, который требует точного указания параметров объекта.

Предлагаемый подход может быть рекомендован для использования при управлении объектами с переменными параметрами различной физической природы.

Библиографический список

1. *Hauser J., Sastry S., Kokotovic P.* Nonlinear Control via Approximate Input-Output Linearization: The Ball and Beam Example // IEEE Transaction on Automatic Control. 1992. Vol. 37. Nr. 3. P. 392–398.

2. *Salem F. A.* Mechatronics Design of Ball and Beam System: Education and Research // Control Theory and Informatics. 2013. Vol. 3. Nr. 4. P. 1–26.

3. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

4. *Гудвин Г. К., Гребе С. Ф., Сальгадо М. Э.* Проектирование систем управления. М.: Бином, 2004. 911 с.

5. *Emhemed A. A.* Fuzzy Control for Nonlinear Ball and Beam System // International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS) 2013. Vol. 3. Nr. 1. P. 25–32.

6. *Oh S. K., Jang H. J., Pedrycz W.* The Design of a Fuzzy Cascade Controller for Ball and Beam System: A Study in Optimization with the Use of Parallel Genetic Algorithms // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2009. Vol. 22. P. 261–271.

7. *Li X., Yu W.* Synchronization of Ball and Beam Systems with Neural Compensation // International Journal of Control, Automation and Systems. 2010. Vol. 8. Nr. 3. P. 491–496.

8. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др. М.: Мир, 1993. 368 с.

9. *Бураков М. В.* Нечеткие регуляторы. СПб.: ГУАП, 2010. 252 с.

10. *Takagi T., Sugeno M.* Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control // IEEE Trans. Systems Man Cybernet. 1985. Vol. 15. Nr. 116. P. 116–132.

11. *Бураков М. В, М. С. Брунов.* Структурная идентификация нечеткой модели // Тр. СПИИРАН. 2014. Вып. 3 (34). С. 232–246.

12. *Бураков М. В., Кирпичников А. П.* Нечеткое управление уровнем жидкости в коническом танке // Вестник Казанского технологического ун-та. 2016. Т. 19. № 4. С. 116–119.

13. *Бураков М. В., Брунов М. С.* Нечеткое управление уровнем жидкости в сферическом танке // Сб. тр. НТК «Завалишинские чтения'16». СПб.: ГУАП, 2016 г. С. 44–47.

14. *Бураков М. В.* Теория автоматического управления. Часть 2. СПб.: ГУАП, 2015 г. 144 с.

УДК 620.92:621.311.001.57

***М. В. Бураков*[1]**
кандидат технических наук, доцент

***В. Ф. Шишлаков*[2]**
доктор технических наук, профессор
[1,2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ СРЕДСТВАМИ MATLAB

Эффективное использование фотоэлектрических систем требует точной оценки их характеристик при различных условиях эксплуатации. В статье описаны два варианта моделирования фотоэлектрического модуля на базе пакета MATLAB Simulink. Первый вариант использует физическое моделирование с помощью библиотеки Simscape, содержащей модель фотоэлемента, на базе которой можно описать солнечную панель заданной конфигурации. Преимущество такого подхода заключается в возможности простого подключения других физических моделей – батарей, преобразователей и т. д. Второй вариант основан на использовании математических уравнений, описывающих эквивалентную схему фотоэлемента, включающую в себя источник фототока, диод, резистор и шунтирующий резистор. Здесь возможно проведение более подробного исследования всех аспектов поведения фотоэлемента. Разработанные модели позволяют прогнозировать поведение фотоэлектрических панелей при различной температуре, солнечной радиации и других физических и экологических параметрах. Для проверки работоспособности моделей была использована типовая солнечная панель мощностью 65W. Результаты моделирования показали хорошее соответствие техническим характеристикам производителя.

Ключевые слова: *фотоэлемент, солнечная панель, Матлаб, моделирование.*

***M. V. Burakov*[1]**
PhD, Tech., Associate Professor

***V. F. Shishlakov*[2]**
Dr. Sc., Tech., Professor
[1,2]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC MODULE IN MATLAB

Effective use of photovoltaic systems require an accurate assessment of their characteristics under different conditions. This article describes two options for modeling photovoltaic module based on Matlab Simulink package. The first version uses physical modeling using Simscape library containing the model of photocells, on the basis of which it is possible to describe a solar panel configuration. The advantage of this approach is the ability to easily connect to other physical models – batteries, inverters, etc. The second variant is based on the mathematical equations describing the equivalent circuit of a photocell comprising a photocurrent source, a diode, a resistor and a shunt resistor. It is possible to conduct a more detailed study of all aspects of the behavior of the photocell. The developed models allow to predict the behavior of photovoltaic panels at a different temperature, solar radiation and other physical and environmental parameters. typical solar panel power 65W was used to test models of efficiency. The simulation results are compared with the datasheet information and they found to have good agreement.

Keywords: *solar cells, photovoltaic module, MATLAB, simulation.*

Введение

Использование возобновляемых источников электрической энергии является перспективным направлением современной энергетики [1, 2]. В рамках этого направления солнечная энергия занимает ключевые позиции в силу своей практической неисчерпаемости и доступности во всех точках поверхности Земли. Солнечная энергетика стремительно завоевывает позиции на миро-

вом энергетическом рынке. Фотоэлектрические системы способны непосредственно преобразовывать энергию солнечной радиации в электрическую энергию без выброса вредных веществ в атмосферу. Они отличаются высокой надежностью, поскольку не имеют подвижных частей. Солнечные батареи пригодны как для выработки энергии в больших масштабах, так и для решения проблем энергообеспечения отдельных зданий [3], энергоснабжения автономных подвижных объектов [4], при создании солнечных холодильных систем [5] и во многих других приложениях. Вариации солнечной активности могут быть достаточно точно прогнозируемы [6], но главный недостаток солнечной энергетики заключается в зависимости от погодных и климатических условий [1, 2]. Для обеспечения стабильной выработки электроэнергии в настоящее время все более широко применяются комбинированные установки, в которых энергия солнца сочетается с энергией ветра [7].

Имитационное моделирование солнечных батарей необходимо для синтеза систем управления, позволяющих эффективно вырабатывать энергию в условиях меняющейся внешней среды. Пакет MATLAB обладает широкими возможностями для моделирования систем солнечной энергетики. Решить поставленную задачу можно двумя способами – с использованием Simulink MATLAB или с помощью Simscape MATLAB [8, 9].

Simulink MATLAB является графическим языком программирования, который позволяет представить динамическую систему в виде набора блоков, описываемых определенными математическими зависимостями. При этом можно не только опираться на известные физические зависимости [10], но и строить нейросетевые аппроксимации экспериментальной информации [11].

Библиотека Simscape позволяет использовать физический язык моделирования, в котором имитационная модель объекта формируется с помощью библиотеки физических компонентов из различных областей, таких как электроника, механика, гидравлика, пневматика и др. Понятие программирования в Simscape отличается от программирования в Simulink тем, что функциональные элементы взаимодействуют друг с другом путем обмена энергией через двунаправленные порты связи.

Одновременное использование Simulink и Simscape позволяет выполнить верификацию имитационной модели солнечной батареи.

Солнечная батарея как объект моделирования

Солнечные фотоэлектрические батареи состоят из множества отдельных солнечных фотоэлектрических элементов (ФЭ) (рис. 1).

Солнечный ФЭ преобразует энергию солнечного излучения в электрическую энергию. Действие фотоэлемента основывается на внутреннем фотоэффекте, в процессе которого происходит разделение генерируемых квантами света электронно-дырочных пар на *p-n* переходе, что приводит к генерации электрического тока.

Рис. 1. Конструкция солнечной батареи

Фотоэлектрический элемент может быть представлен в виде функционального блока, имеющего внешние, внутренние и выходные параметры (рис. 2). К внешним параметрам относят освещенность и температуру ФЭ (*G* и *T*). К внутренним параметрам относят напряжение холостого хода (*U*хх) и ток короткого замыкания (*I*кз). Выходные параметры – выходное напряжение (*U*), ток нагрузки (*I*) и выходная мощность (*P*).

Основной характеристикой ФЭ является вольт-амперная характеристика (ВАХ) – зависимость между током нагрузки и напряжением при постоянных значениях температуры и интенсивности поступающего солнечного излучения.

Напряжение холостого хода – напряжение, при котором ток ФЭ равен нулю. Ток короткого замыкания – это ток, при котором напряжение равно нулю. Это крайние точки ВАХ, в которых мощность ФЭ равна нулю. Максимальное значение произведения тока и напряжения при постоянных значениях освещенности и температуры определяет точку максимальной мощности.

Для получения большого выходного напряжения ФЭ подключаются последовательно, а для достижения большого выходного тока ячейки соединяются параллельно (рис. 3).

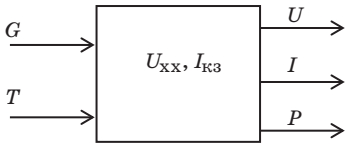


Рис. 2. Параметры ФЭ

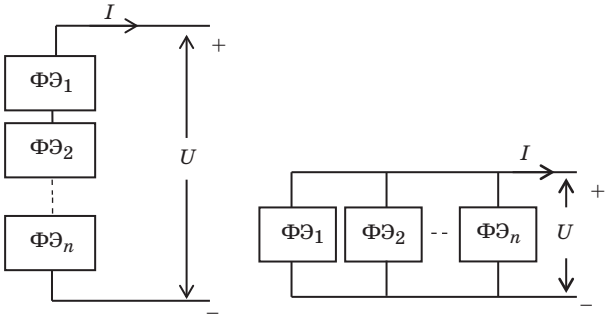


Рис. 3. Последовательное и параллельное включение ФЭ

В статье рассмотрено имитационное моделирование солнечного модуля NP65GK с характеристиками, представленными в табл. 1.

Таблица 1

P_{max}	I_{max}, А	U_{max}, В	$I_{кз}$, А	U_{xx}, В
65 Вт	3,74	17,4	4,14	21,7

Использование Simscape MATLAB

Модель ФЭ в библиотеке Simscape имеет три контакта: уровень солнечной радиации и токовый вход и выход. Последовательное соединение шести ФЭ показано на рис. 4.

Аналогично можно сформировать модуль из 36 ФЭ, входящих в состав солнечного модуля NP65GK (рис. 5).

На рис. 6 показана схема исследования солнечной батареи в Simscape, с помощью которой можно получить вольт-амперную и мощностную характеристики солнечного модуля.

Полученные в результате вычислительного эксперимента зависимости представлены на рис. 7 и 8.

Полученные характеристики являются основными для солнечного модуля, однако могут представлять интерес также температурные зависимости, которые нельзя получить, используя модель ФЭ в Simscape. Для исследования влияния температуры на параметры солнечного модуля можно использовать язык графического моделирования Simulink, опирающийся на аналитическое описание системы.

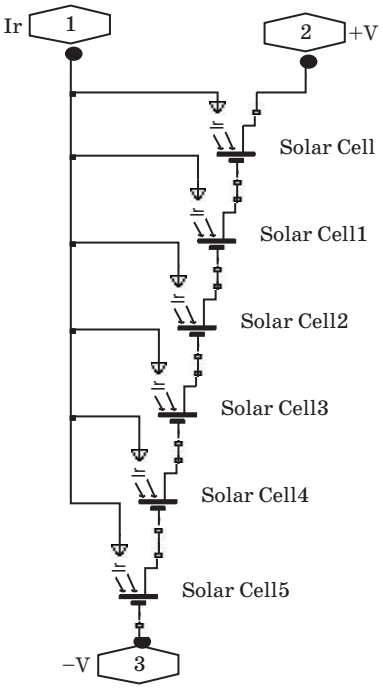


Рис. 4. Объединение ФЭ в Simscape

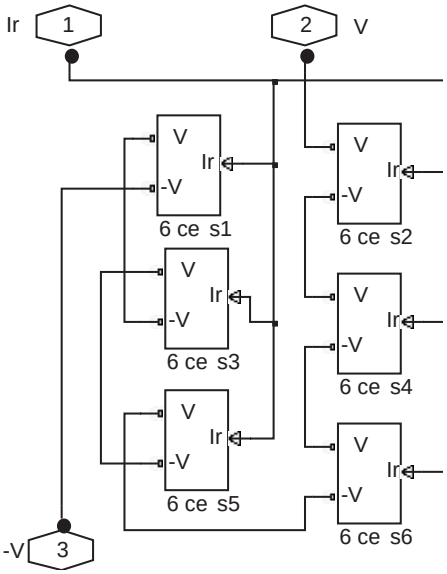


Рис. 5. Модуль из 36 ФЭ

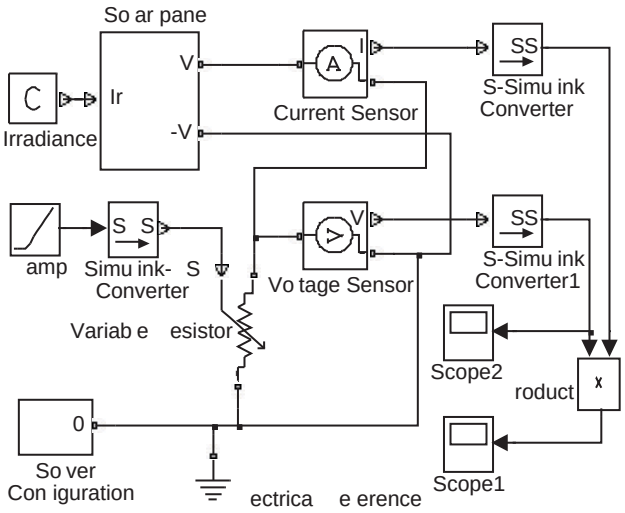


Рис. 6. Блок-схема эксперимента в Simscape

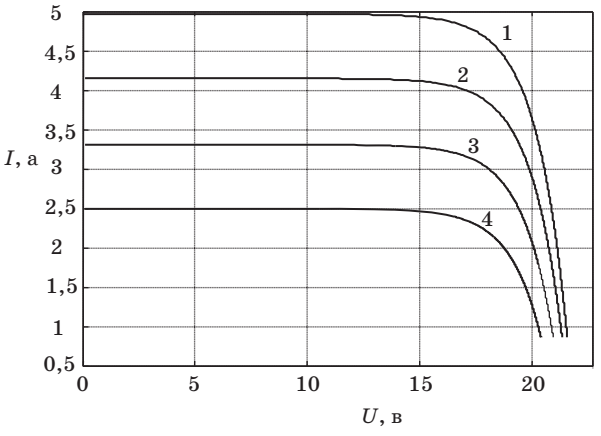


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика солнечного модуля при различных значениях освещенности: 1 – 1200 Вт/м²; 2 – 1000 Вт/м²; 3 – 800 Вт/м²; 4 – 600 Вт/м²

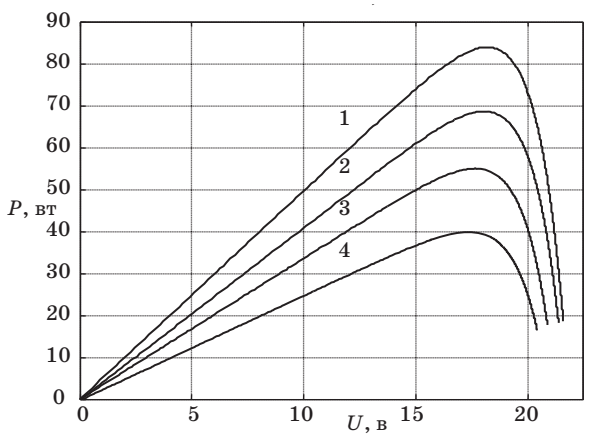


Рис. 8. Мощностная характеристика солнечного модуля при различных значениях освещенности: 1 – 1200 Вт/м^2; 2 – 1000 Вт/м^2; 3 – 800 Вт/м^2; 4 – 600 Вт/м^2

МОДЕЛИРОВАНИЕ В SIMULINK MATLAB

Математическая модель ФЭ, описание которой приводится в работах [12–15], основана на анализе структуры, представленной на рис. 9.

На рис. 9 $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{ш}}$ – последовательное и параллельное (шунтирующее) сопротивление (паразитные параметры ФЭ).

В соответствии с первым законом Кирхгофа можно записать:

$$I = I_{\text{ф}} - I_{\text{д}} - I_{\text{ш}}, \tag{1}$$

где $I_{\text{ф}}$ – фототок, $I_{\text{д}}$ – ток диода, $I_{\text{ш}}$ – ток шунтирующего сопротивления.

По второму закону Кирхгофа:

$$I_{\text{ш}} = \frac{U + IR_{\text{п}}}{R_{\text{ш}}}. \tag{2}$$

Величина тока, протекающего через *p-n*-переход (через диод), зависит от приложенного к нему напряжения согласно формуле

$$I_{\text{д}} = I_0\left(\exp\left(\frac{q\left(U + IR_{\text{п}}\right)}{AkT}\right) - 1\right), \tag{3}$$

где I_0 – обратный ток насыщения; U – выходное напряжение; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; A – диодный фактор (константа идеальности); T – абсолютная температура ФЭ (К), I – выходной ток.

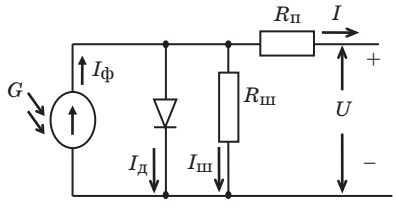


Рис. 9. Электрическая схема замещения ФЭ

Величина фототока описывается формулой

$$I_{\Phi}(T_{\text{н}}) = \frac{G}{G_{\text{н}}} I_{\text{кз}}(T_{\text{н}}),$$

$$I_{\Phi}(T) = I_{\Phi}(T_{\text{н}})\left(1 + T_k\left(T_{\text{н}} - T\right)\right), \tag{4}$$

где G – освещенность солнечного элемента (Вт/м^2); $G_{\text{н}}$ – номинальная освещенность (Вт/м^2); T_k – температурный коэффициент фототока; T – температура окружающей среды; $T_{\text{н}}$ – номинальная температура (25 °С).

Температурный коэффициент вычисляется по формуле:

$$T_k = \frac{I_{\text{кз}}(T_2) - I_{\text{кз}}(T_1)}{T_2 - T_1}.$$

Подставляя (2), (3), (4) в (1), получаем выражение для описания тока солнечного элемента:

$$I = I_{\text{кз}}\frac{G}{G_{\text{н}}}\left(1 + Tk\left(T - T_{\text{н}}\right)\right) - I_0\left(\exp\left(\frac{q\left(U + IR_{\Pi}\right)}{AkT}\right) - 1\right) - \frac{U + IR_{\text{п}}}{R_{\text{ш}}}. \tag{5}$$

Можно считать, что $R_{\text{ш}}$ стремится к бесконечности, тогда в (5) можно пренебречь последним слагаемым.

$$I = I_{\text{кз}}\frac{G}{G_{\text{н}}}\left(1 + Tk\left(T - T_{\text{н}}\right)\right) - I_0\left(\exp\left(\frac{q\left(U + IR_{\text{п}}\right)}{AkT}\right) - 1\right), \tag{6}$$

где I_0 – обратный ток насыщения, описываемый формулой

$$I_0 = I_0(T_{\text{н}})\left(\frac{T}{T_{\text{н}}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{qE_g}{Ak}\right)\left(\frac{1}{T_{\text{н}}} - \frac{1}{T}\right)\right), \tag{7}$$

где E_g – полоса пропускания диода.

Обратный ток насыщения при номинальной температуре рассчитывается по формуле

$$I_0(T_{\text{н}}) = \frac{I_{\text{кз}}(T_{\text{н}})}{\exp\left(\frac{qU_{\text{хх}}(T_{\text{н}})}{AkT_{\text{н}}}\right) - 1}. \tag{8}$$

Параметры, принятые при моделировании, указаны в табл. 2.

Формулы (1)–(8) позволяют собрать в Simulink модель солнечного модуля и выполнить вычислительные эксперименты при любых заданных условиях.

На рис. 10 и 11 исследовано влияние температуры на вольт-амперную и мощностную характеристики солнечной батареи.

Таблица 2

Последовательное сопротивление R_s	0,001 Ом
Заряд электрона (q)	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Больцмана (k)	$1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Фактор идеальности диода (A)	1,6
Температурный коэффициент T_k	0,68 мА
Последовательное сопротивление ($R_п$)	1 Ом
Номинальная освещенность ($G_н$)	1000 Вт/м^2
Номинальная температура ($T_н$)	25 °С
Количество последовательно соединенных ячеек (N_s)	36

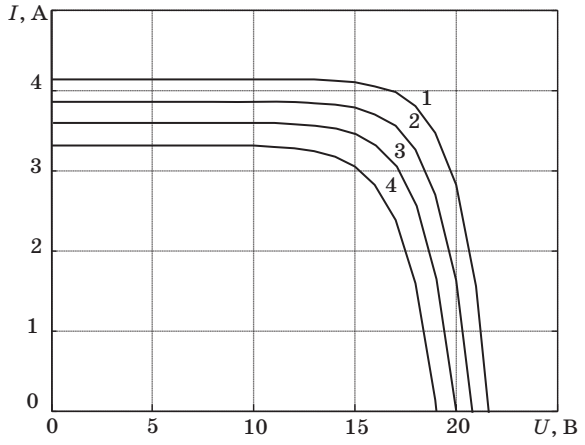


Рис. 10. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи при различных значениях температуры: 1–25 °С; 2–35 °С; 3–45 °С; 4–55 °С

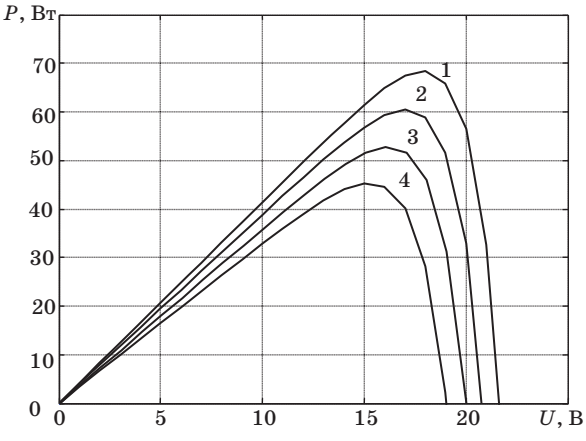


Рис. 11. Изменение мощности солнечной батареи при различных значениях температуры: 1–25 °С; 2–35 °С; 3–45 °С; 4–55 °С

Были также получены графики зависимости тока и мощности при различном уровне солнечной радиации, они соответствуют рис. 8 и 9.

Результаты моделирования показывают, что характеристики солнечного модуля существенно нелинейны и обнаруживают сильную зависимость от внешних условий – солнечной радиации и температуры окружающей среды.

ВЫВОДЫ

Результаты вычислительных экспериментов соответствуют техническим характеристикам солнечного модуля NP65GK. Модель, полученная с помощью физического моделирования в Simscape, показала параметры, практически идентичные параметрам модели, собранной с помощью графического программирования Simulink. Обе модели могут быть использованы при проектировании системы управления точкой максимальной мощности солнечного модуля.

Библиографический список

1. *Messenger R. A., Ventre J.* Photovoltaic Systems Engineering. CRC PRESS, 2004. 435 p.

2. *Markvart T.,* Solar Electricity. Wiley, 2000. 280 p.

3. Techno-Economical Analysis of Hybrid PV-WT-Hydrogen FC System for a Residential Building with Low Power Consumption / G. Badea, R.-A. Felseghi, M.-S. Raboaca etc. // Problemele Energeticii Regionale. Vol. 3. № 32. 2016. P. 78–84.

4. *Иванов В. П.* Estimation of Opportunity of Solar Energy Using for Flight of the Flying Vehicle // SPIIRAS Proceedings. 2005. Issue 2. Vol. 2. P. 373–378.

5. *Doroshenko A. V., Ludnitsky K. V.* Processes of Heat-mass-Transfer in Apparatus of Solar Absorbing Refrigeration Systems // Problemele Energeticii Regionale. 2014. Vol. 3. № 26. P. 31–45.

6. *Chernykh Y. V.* Methods of the Analysis of Data Lines, Connected with Solar Activity // SPIIRAS Proceedings. 2003. Issue 1. Vol. 3. P. 126–136.

7. The Concept of Development of Intelligent Protected Control Systems for Objects of Decentralized Energetic / L. I. Chubraeva, A. L. Ronzhin, A. V. Shyshlakov etc. // SPIIRAS Proceedings. 2014. Issue 2 (33). 33. P. 207–226.

8. *Dyakonov V. P.* MATLAB R2007/2008/2009 for Radio Engineers M.: DMK Press, 2010. P. 976.

9. *Черных И. В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.

10. *Mahajan P. B., Bhole A. A.* Modeling of Photovoltaic Module // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2015. Vol. 02. Nr 03. P. 496–500.

11. MATLAB Simulink of Photovoltaic System Based on a Two-Diode Model Simulator with Shaded Solar Cells / N. Belhaouas, M. S. Ait Cheikh, A. Malek, C. Larbes // Revue des Energies Renouvelables. 2013. Vol. 16. Nr 1. P. 65–73.

12. *Hadjab M., Berrah S., Abid H.* Neural Network for Modeling Solar Panel // International Journal of Energy. 2012. Vol. 6. Nr 1. P. 9–16.

13. *Васильев А. М., Ландсман А. П.* Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Советское радио, 1976. 246 с.

14. *Раушенбах Г.* Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. P. 360.

15. *Timashov S. V., Grilikhes V. A.* Photovoltaic Solar Energy Converters. M.: MO SSSR, 1985. P. 78.

УДК 62-52

А. Е. Городецкий
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)

В. Г. Курбанов
кандидат физико-математических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

И. Л. Тарасова
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)

ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАЗОВ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ РОБОТОВ

Интеллектуальные электромеханические системы (SEMS) используются в киберфизических системах и, в частности, в интеллектуальных роботах. Эти системы имеют возможность интегрировать функции вычисления, управления, коммуникации, хранения информации, мониторинга, измерения и контроля собственных параметров и параметров окружающей среды. Важно иметь в виду, что поведение системы основывается на информации, полученной от сенсорных датчиков центральной нервной системы (ЦНС) робота о состоянии окружающей среды и системы. Целью публикации является описание алгебраического подхода формирования образов на основе сенсорных данных роботов, построенных на базе модулей SEMS. Результаты: предложен алгебраический подход формирования образов на основе сенсорных данных роботов, построенных на базе модулей SEMS. Практическая значимость: предложенный в статье алгебраический подход формирования образов на основе сенсорных данных можно использовать для формирования стратегии и тактики управления интеллектуальными роботами.

Ключевые слова: *умные электромеханические системы, центральная нервная система робота, логическое уравнение, Булева алгебра, управление, образ.*

A. E. Gorodetskiy
Dr. Sc., Tech., Professor
Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences

V. G. Kurbanov
PhD, Phys.-Math., Assistant Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

I. L. Tarasova
PhD, Tech., Senior Researcher
Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences

FORMATION OF IMAGES BASED ON SENSORY DATA OF ROBOTS

Purpose: Intelligent electromechanical systems (SEMS) are used in cyberphysical systems and, in particular, in intelligent robots. These systems have the ability to integrate the functions of calculation, control, communication, information storage, monitoring, measurement and control of own parameters and environmental parameters. It is important to bear in mind that the behavior of the system is based on information obtained from sensory sensors of the central nervous system (CNS) of the robot about the state of the environment and the state of the system. The purpose of the publication is to describe the algebraic

approach of image formation based on sensory data from robots built on the basis of SEMS modules. Results: An algebraic approach is proposed for the formation of images based on sensory data from robots built on the basis of SEMS modules. Practical significance: The algebraic approach of image formation based on sensory data can be used to formulate the strategy and tactics of managing intelligent robots.

Keywords: *smart electromechanical systems, central nervous system of the robot, logical equation, Boolean algebra, control, image.*

Введение

Функционирование системы автоматического управления (САУ) робота опирается на информацию от сенсорных систем относительно окружающей обстановки и состояния самого робота. Без этой информации САУ не сможет принять ожидаемого от нее решения, т. е. определять цели функционирования и достигать этих целей [1]. Однако для того чтобы роботы, создаваемые на основе модулей SEMS, могли самостоятельно, обходясь без вмешательства человека, формулировать задачи и успешно их выполнять, они должны быть снабжены не только более совершенными датчиками ощущений (сенсорами), но и обладать способностью понимать язык ощущений, т. е. обладать чувствами типа «свой – чужой», «опасно – безопасно», «любимый – нелюбимый», «приятно – неприятно» и др., формируемыми в результате решения систем логических уравнений. При наличии способностей к формированию такой базы данных в центральной нервной системе робота (ЦНСР) появляется возможность самостоятельного принятия решений относительно целесообразного поведения [2].

Фаззификация данных

Первой и очень важной операцией для дальнейших логических построений при принятии решений является фаззификация данных, поступающих по сенсорным информационным каналам ЦНСР от различных датчиков. Для этого, прежде всего, объединим сенсоры в группы, образующие, подобно человеку, следующие органы чувств робота: зрение в виде множества X; слух в виде множества Y; обоняние в виде множества Z; вкус в виде множества U; осязание в виде множества V; равновесие в виде множества W и телепатию в виде множества Q.

В каждом из введенных множеств можно выделить образующие их подмножества, характеризующие свойства наблюдаемого или изучаемого объекта:

$$X_i \subset X,\ Y_i \subset Y,\ Z_i \subset Z,\ U_i \subset U,\ V_i \subset V,\ W_i \subset W,$$
$$Q_i \subset Q.$$

Набор таких подмножеств зависит от набора сенсоров, образующих органы чувств конкретного робота. Например, для зрения могут быть введены следующие подмножества: X_1 – контур изображения; X_2 – размер изображения; X_3 – яркость изображения; X_4 – цвет изображения; X_5 – расстояние до объекта; X_6 – скорость приближения; X_7 – скорость удаления.

Для слуха могут быть введены следующие подмножества: Y_1 – громкость; Y_2 – тональность; Y_3 – интервал; Y_4 – скорость приближения; Y_5 – скорость удаления; Y_6 – направление.

Для обоняния могут быть введены следующие подмножества: Z_1 – тип запаха; Z_2 – интенсивность запаха; Z_3 – направление запаха; Z_4 – скорость приближения; Z_5 – скорость удаления.

Для вкуса могут быть введены следующие подмножества: U_1 – тип вкуса; U_2 – сила вкуса; U_3 – направление.

Для осязания могут быть введены следующие подмножества: V_1 – ровность поверхности; V_2 – сухость поверхности; V_3 – температура поверхности.

Чувство равновесия у роботов обеспечивается обычно гироскопами. В этом случае могут быть введены следующие подмножества: W_1 – отклонение «вверх – вниз»; W_2 – отклонение «вперед – назад»; W_3 – отклонение «влево – вправо»; W_4 – скорость отклонения «вверх – вниз»; W_5 – скорость отклонения «вперед – назад»; W_6 – скорость отклонения «влево – вправо».

Телепатия у роботов, в отличие от человека, вполне объяснимое явление приема и передачи сообщений по каналам беспроводной связи. В настоящее время наиболее широко для этого используется Wi-Fi. Наиболее просто подмножества Q_i, образующие множество Q, сформировать заранее, на стадии проектирования SEMS, предназначенной для выполнения тех или иных технологических операций. В этом случае такими подмножествами будут инструкции или типы реакций ($q_{ij} \in Q_i$), которые хранятся в памяти робота и извлекаются оттуда машиной логического вывода [3] по мере выполнения тех или иных правил работы с данными из подмножеств ($x_{ij} \in X_i$; $y_{ij} \in Y_i$; $z_{ij} \in Z_i$; $u_{ij} \in U_i$; $v_{ij} \in V_i$; $w_{ij} \in W_i$).

Правила работы с данными обычно имеют вид

$$If\ (x_{ij} = 1 \wedge y_{ij} = 1 \wedge z_{ij} = 1 \wedge u_{ij} = 1 \wedge v_{ij} = 1 \wedge w_{ij} = 1),$$
$$then\ q_{ij} = 1. \qquad (1)$$

При большом количестве логических переменных таких правил может быть также очень много. Тогда последовательный перебор правил

с целью выявления их выполнимости будет занимать значительное время. В этом случае желательно использовать параллельные вычисления. Для этого, как показано в [4], можно использовать процедуру алгебраизации логических выражений, заключающуюся в следующем.

Правила вида (1) представляют собой импликации на языке алгебры логики или Булевой алгебры:

$$x_{ij} \wedge y_{ij} \wedge z_{ij} \wedge u_{ij} \wedge v_{ij} \wedge w_{ij} \rightarrow q_{ij}. \quad (2)$$

Выражения вида (2) можно преобразовать в форму алгебры Жегалкина или в эквивалентные алгебраические уравнения по mod2 [5].

$$s_{ij} \oplus s_{ij} * q_{ij} \oplus 1 = b_{ij}, \quad (3)$$

где $\oplus$ – знак сложения по mod2, $*$ – знак умножения по mod2, b_{ij} принимает значение либо 0, либо 1 и $s_{ij} = x_{ij} \wedge y_{ij} \wedge z_{ij} \wedge u_{ij} \wedge v_{ij} \wedge w_{ij}$.

Тогда полученную систему логических уравнений можно записать в матричной форме по mod2 [6]:

$$A * F = B, \quad (4)$$

где B – двоичный вектор размерностью n, F – фундаментальный вектор логической системы размерностью n, строящийся из комбинаций логических переменных x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, u_{ij}, v_{ij}, w_{ij}, q_{ij}, полученных при фаззификации сенсорных данных, и дополненный 1 на месте последнего элемента, A – прямоугольная двоичная матрица размерностью $[n, m]$.

Процедуру получения системы уравнений (4) легко формализовать. Для этого вначале можно построить фундаментальный вектор F системы:

$$F^T = \begin{vmatrix} s_{11}, s_{12}, \cdots s_{1n}, s_{21}, \cdots, s_{mn}, s_{11} * s_{12}, \cdots, \\ s_{11} * s_{12} * \cdots s_{mn}, s_{11} * q_{11}, \cdots, \\ s_{11} * s_{12} * \cdots s_{mn} * q_{11} * \cdots * q_{mn}, 1. \end{vmatrix} \quad (5)$$

При этом используется следующий алгоритм построения:

– перечисляются все логические переменные сенсорных данных;

– после них перечисляются все сочетания по два из логических переменных сенсорных данных;

– затем перечисляются все сочетания по три из логических переменных сенсорных данных;

– затем перечисляются все сочетания по четыре из логических переменных сенсорных данных;

– и так далее, а в конце помещают произведение всех логических переменных сенсорных данных.

После этого строят фундаментальную матрицу **A** системы:

$$A = \begin{vmatrix} 100\ldots0 \\ 010\ldots0 \\ \ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots \\ 000\ldots1 \\ 110\ldots0 \\ 101\ldots0 \\ \ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots \\ 00..011 \\ 111\ldots0 \\ 1101..0 \\ 11001.0 \\ \ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots \\ 111111 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Алгоритм построения матрицы **A** следующий:

– в первой строке в первом столбце ставится 1, а в остальных 0;

– во второй строке во втором столбце ставится 1, а в остальных 0;

– и так далее, пока не будет 1 в последнем столбце;

– затем ставится 1 в двух первых столбцах, а в остальных 0;

– затем ставится 1 в первом и третьем столбцах, а в остальных 0;

– затем ставится 1 в первом и четвертом столбцах, а в остальных 0;

– и так далее, пока не будет две 1 в двух последних столбцах;

– затем ставится 1 в трех первых столбцах, а в остальных 0;

– затем ставится 1 в первом, третьем и четвертом столбцах, а в остальных 0;

– затем ставится 1 в первом, четвертом и пятом столбцах, а в остальных 0;

– и так далее, пока не будет три 1 в трех последних столбцах;

– и так далее, пока не будут 1 во всех столбцах.

Естественно, что полученная таким способом матричная система уравнений по mod2 вида (4) будет иметь большую размерность. Однако в реальной ЦНС роботов не все компоненты этого уравнения (не все сочетания логических переменных) физически реализуемы и могут быть отброшены. В результате такой редукции мы получим матричную систему уравнений по mod2 меньшей размерности [7]:

$$C * R = G, \quad (7)$$

где $C \subset A$, $R \subset F$, $G \subset B$.

Данные логического типа (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, u_{ij}, v_{ij}, w_{ij}, q_{ij}) извлекаются из данных или сигналов от сенсоров органов чувств роботов путем их фаззификации [7].

При фаззификации логические переменные, например, v_{3j}, образуются путем квантования всего диапазона датчика температуры и присвоения полученным квантам Δ_{3i} имен логических переменных v_{3j}, принимающих значения истина (1) или ложно (0). Тогда, если входная переменная – температура T может изменяться в пределах от –20° С до +20° С, то, введя квант в 10° С, можно весь диапазон изменения температуры разбить на четыре кванта Δ_{31} = [–20, –10], Δ_{32} = [–10, 0], Δ_{33} = [0, +10], Δ_{34} = [+10, +20]. Затем кванту Δ_{31} можно присвоить имя v_{31} {очень холодно}, кванту Δ_{32} присвоить имя v_{32} {холодно}, кванту Δ_{33} присвоить имя v_{33} {прохладно} и кванту Δ_{34} присвоить имя v_{34} {тепло}. При этом:

– логической переменной v_{31} будет соответствовать интервал

$$[(-20+20)/(20+20), (-10+20)/(20+20)] = [0, 0{,}25];$$

– логической переменной v_{32} будет соответствовать интервал

$$[(-10+20)/(20+20), (0+20)/(20+20)] = [0{,}25, 0{,}5];$$

– логической переменной v_{33} будет соответствовать интервал

$$[(0+20)/(20+20), (10+20)/(20+20)] = [0{,}5, 0{,}75];$$

– логической переменной v_{34} будет соответствовать интервал

$$[(10+20)/(20+20), (20+20)/(20+20)] = [0{,}5, 1].$$

В частности, если, например, датчик показывает температуру t = +50° С, то после фаззификации в базу данных ЦНСР будут занесены следующие значения логических переменных: $v_{31} = 0$, $v_{32} = 0$, $v_{33} = 1$, $v_{34} = 0$ и соответствующие им описанные выше интервалы как атрибуты этих логических переменных.

В более сложных случаях в качестве атрибутов могут быть вероятности ($P\{x_{ij} = 1\}$ или функции принадлежности $\mu(x_{ij})$. В этом случае данные от сенсоров органов чувств роботов хранятся в памяти в виде логико-вероятностных либо логико-лингвистических переменных [8], когда в качестве атрибутов, получаемых после фаззификации логических переменных, в базе данных ЦНСР будут храниться вероятности либо функции принадлежности. В этом случае машина логического вывода ЦНСР практически всегда будет получать не одно решение, а несколько с разной степенью уверенности.

Например, если $x_{ij} = 1$ с вероятностью P_x, и $y_{ij} = 1$ с вероятностью P_y, и $z_i = 1$ с вероятностью P_z, и $u_{ij} = 1$ с вероятностью P_u, и $v_{ij} = 1$ с вероятностью P_v, и $w_{ij} = 1$ с вероятностью P_w, то $q_{ij} = 1$ с вероятностью P_q.

Кроме того, не любое решение, полученное из системы (7), выполнимо конкретным роботом в текущем окружении (состоянии среды функционирования). Это означает, что полученное ЦНСР решение из (7) должно удовлетворять ограничениям, которые также могут быть выражены в виде систем логических уравнений [9]:

$$C_i \cdot R_i = H; \tag{8}$$

$$C_j \cdot R_j = D, \tag{9}$$

где C_i и C_j – матрицы ограничений, получаемые по аналогии с матрицей C, H и D – двоичные вектора, получаемые по аналогии с вектором G, $R_i \subset F_i$ и $R_j \subset F_j$.

При этом вектора F_i и F_j образуются аналогично вектору F (см. формулу (5)):

$$F_i^T = \left| \begin{matrix} s_{11}, s_{12}, \ldots, s_{1n}, s_{21}, \ldots, s_{mn}, s_{11} \cdot s_{12}, \ldots, s_{11} \cdot s_{12} \cdot \ldots \cdot \\ \cdot s_{mn}, s_{11} \cdot q_{11}, \ldots, s_{11} \cdot s_{12} \cdot \ldots \cdot s_{mn} \cdot g_{11} \cdot \ldots \cdot g_{mn}, 1 \end{matrix} \right| \tag{10}$$

$$F_j^T = \left| \begin{matrix} s_{11}, s_{12}, \ldots, s_{1n}, s_{21}, \ldots, s_{mn}, s_{11} \cdot s_{12}, \ldots, s_{11} \cdot s_{12} \cdot \ldots \cdot \\ \cdot s_{mn}, s_{11} \cdot q_{11}, \ldots, s_{11} \cdot s_{12} \cdot \ldots \cdot s_{mn} \cdot l_{11} \cdot \ldots \cdot l_{mn}, 1 \end{matrix} \right| \tag{11}$$

где g_{ij} – логические переменные, характеризующие технические ограничения, связанные с конструкцией данного робота, а l_{ij} – логические переменные, характеризующие технические ограничения, связанные с состоянием окружающей среды (среды функционирования данного робота в данный момент).

Множество решений, получаемых ЦНСР при решении уравнений (7), (9), естественно, будут приводить к неоднозначности поведения робота. Человек в данной ситуации ведет себя целесообразно или целеустремленно интуитивно, опираясь на собственный опыт либо генетически заложенный поведенческий стереотип [10]. Задача наделения роботов навыками целесообразного поведения пока находится на самом начальном этапе. В настоящее время наиболее полно изучены проблемы выбора оптимальных решений в условиях не полной определенности интервального, вероятностного либо лингвистического типа [11].

Заключение

Предложенный подход формирования образов на основе информации от центральной нервной системы робота с использованием алгебраизации и матричного решения систем логических уравнений можно эффективно применять при формировании стратегии и тактики управления интеллектуальными роботами в условиях не полной определенности.

Благодарности

Работа частично поддержана грантами РФФИ (проекты 16-29-04424, 15-07-04760-а).

Библиографический список

1. *Добрынин Д. А.* Интеллектуальные роботы вчера, сегодня, завтра // X национальная конференция по искусственному интеллекту с междун. участием КИИ-2006 (25–28 сентября 2006 г., Обнинск): Тр. конф. В 3 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2006.

2. *Аккоф Р., Эмери Ф.* О целеустремленных системах. М.: Сов. Радио, 1974. 269 с.

3. *Городецкий А. Е., Ерофеев А. А.* Принципы построения интеллектуальных систем управления подвижными объектами // Автоматика и телемеханика. 1997. № 9.

4. *Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Ерофеев А. А.* Алгебраический подход к решению задач логического управления // А и Т. 2000. № 2. С. 127–138.

5. *Жегалкин И. И.* Арифметизация символической логики // Матем. сб. 1928. Т. 35. Вып. 3–4. С. 335.

6. *Дубаренко В. В., Курбанов В. Г.* Метод приведения систем логических уравнений к форме линейных последовательностных машин // Радиотехника. Информационно-измерительные и управляющие системы. М. 2009. № 4. Т. 7. С. 37–40.

7. Логико-вероятностные методы моделирования плохо формализуемых процессов и систем / А. Е. Городецкий, В. В. Дубаренко, В. Г. Курбанов, И. Л. Тарасова // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 6 (131). С. 255–257.

8. *Городецкий А. Е.* Основы теории интеллектуальных систем управления. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH@Co. KG, 2011. 313 с.

9. *Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л.* Эргатические методы анализа процессов эксплуатации и принятия решений при повреждениях и авариях энергообъектов // Информационно-управляющие системы. 2013. №6. С. 29–36.

10. *Gorodetsky A. E.* Fuzzy Decision Making in Design on the Basis of the Habituality Situation Application // Fuzzy Systems Design. Social and Engineering Applications. Physica-Verlag. A Springer-Verlag Company. N. Y. 1998. P. 63–73.

11. *Gorodetskiy A. E., Kurbanov V.* G, Tarasova I. L. Methods of Synthesis of Optimal Intelligent Control Systems SEMS // Smart Electromechanical Systems. Springer International Publishing. 2016. 277 p.

УДК 62-503.56

Н. В. Жукова[1]
кандидат технических наук, доцент, научный руководитель

А. М. Быкова[2]
студентка
[1,2]*Донецкий национальный технический университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕРВАЛА УПРАВЛЕНИЯ MPC-КОНТРОЛЛЕРА НА ВРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В САУ ТЕМПОМ ЗАГРУЗКИ ДОМЕННОЙ ШИХТЫ

В статье описывается влияние интервала управления MPC-контроллера на транспортное запаздывание в системе.

Ключевые слова: *MPC-контроллер, интервал управления, горизонт предсказания, горизонт управления, запаздывание.*

N. V. Zhukova[1]
PhD, Tech., Associate Professor, Research Instructor

A. M. Bykova[2]
Student
[1,2]*Donetsk National Technical University*

RESEARCH OF THE IMPACT OF CONTROL INTERVAL THE MPC CONTROLLER ON THE TIME DELAY IN ACS RATE OF LOAD OF THE DOMAIN CHARGE

The article describes the influence of the MPC controller control interval on the transport delay in the system.

Keywords: *MPC controller, the control interval, prediction horizon, control horizont, delay.*

Постановка проблемы. В технологических процессах часто встречается такой вид запаздывания, который называется транспортным. Такое запаздывание образуется, когда, например, вещество или энергия перемещаются с определенной скоростью из одной точки в другую без какого-либо изменения их свойств и характеристик [1]. Чистое запаздывание существенным образом влияет на протекание процесса в системе управления, так как может вызывать проблемы с обеспечением устойчивости, робастности и качества управления. Например, при резком нарушении уровня засыпи шихты на колошнике доменной печи, вызванном запаздыванием подачи материала, может произойти аварийная ситуация или же качество выплавки чугуна ухудшится [2]. С этой целью необходимо обеспечить компенсацию времени запаздывания для устранения вышеназванных проблем. В [3] авторами решена данная актуальная задача на основе предиктора Смита. Система с предиктором Смита обеспечивает высокую статическую и динамическую устойчивость и точность при изменении задания по уровню засыпи, а также нечувствительна к ступенчатому изменению погонной плотности шихты, подающейся на конвейерную ленту. Целью же данной публикации является исследование и анализ компенсации запаздывания на основе прогнозирующей модели с помощью MPC-регулятора (Model Predictive Control).

Методика решения. Одним из современных формализованных подходов к анализу и синтезу систем управления, базирующихся на математических методах оптимизации, является теория управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей [4]. Данный поход является улучшением классического управления с отрицательной обратной связью, в котором учитывается предсказание поведения объекта управления на различные типы входных воздействий. Регулятор полагается на эмпирическую модель процесса для того, чтобы предсказать дальнейшее его поведение, основываясь на предыдущих значениях переменных состояния. Кроме того, возможен учет транспортного запаздывания, учет изменений критериев качества в ходе процесса и отказов датчиков системы измерения [5].

MPC Toolbox может обрабатывать модели, включающие в себя задержки во входных и выходных каналах [6]. Алгоритм MPC использует знания о динамических характеристиках технологического процесса. Все взаимодействия между переменными процесса рассчитываются на основе непрерывного решения в реальном масштабе времени. Основные элементы схемы управления динамическим объектом в соответствии со стратегией MPC это: эквивалентная модель в пространстве состояний, учитывающая внутренние взаимосвязи между переменными состояния, на основе которой строится прогноз в пределах горизонта предсказания (оценка состояния, включая возмущение) в реальном масштабе времени; предсказание будущих состояний на основе модели; оптимизация в реальном масштабе времени будущей траектории движения системы с учетом действующих ограничений методом квадратичного программирования; выполнение первого шага управляющей последовательности [7].

При формировании эквивалентной модели объекта управления в пространстве состояний за основу была принята модель по каналу управления и возмущения, полученная в [3] и проверенная на условие управляемости и наблюдаемости. При формировании MPC-контроллера заданы основные его параметры: горизонт предсказания, интервал управления и горизонт управления. Горизонт предсказания – это временной интервал, на котором будут предсказываться выходные сигналы для их учета в управляющем сигнале. Он должен быть достаточно большим, чтобы учесть основную динамику модели. Интервал управления – это реалистичный шаг для вычисления управляющего сигнала (величина дискретизации шага MPC-контроллера). Горизонт управления должен быть меньше или равным горизонту предсказания, для того чтобы также учесть основную динамику объекта. Он выбирается исходя из времени регулирования самой модели.

При выборе вышеописанных параметров возникает проблема, связанная с попыткой контроллера противодействовать так называемому «эффекту задержки», вследствие чего на переходных характеристиках управляющего воздействия и уровня засыпи на колошнике наблюдались резкие скачки (рис. 1).

Для устранения данной проблемы была выбрана стратегия Blocking, описанная в [8]. При исследовании влияния изменения интервала управления на переходной процесс темпа загрузки шихты в доменную печь время запаздывания в системе составляет $\tau = 5$ с. Интервал управления τ_u был выбран равным 3, 5, 10 с соответственно, а горизонт предсказания $t_{\text{пр}} = 20$ с, исходя из того, что время переходного процесса темпа загрузки с ПД-регулятором составляет 16 с [3]. Получены следующие переходные процессы выхода регулятора и уровня засыпи на колошнике (рис. 2).

Анализируя переходные характеристики (рис. 2), можно сделать выводы:

– при $\tau_u = 3$ с, $\tau = 3$ с время переходного процесса 26 с, перерегулирования не наблюдается, изменение уставки уровня с 1,25 до 2 м на 80-й с система отрабатывает за 23 с;

– при $\tau_u = 5$ с, $\tau = 5$ с время переходного процесса 46 с, перерегулирования также не наблюдается, изменение уставки уровня с 1,25 до 2 м на 80-й с система отрабатывает за 30 с;

– при $\tau_u = 10$ с запаздывания не наблюдается, время переходного процесса 55 с, перерегулирования не наблюдается, изменение уставки с 1,25 до 2 м на 80-й с система отрабатывает за 50 с.

Таким образом, при увеличении интервала управления время запаздывания уменьшается, время регулирования в системе увеличивается, но растет статическая ошибка на выходе системы. При уменьшении интервала управления время запаздывания незначительно увеличивается в системе, наблюдается перерегулирование, при

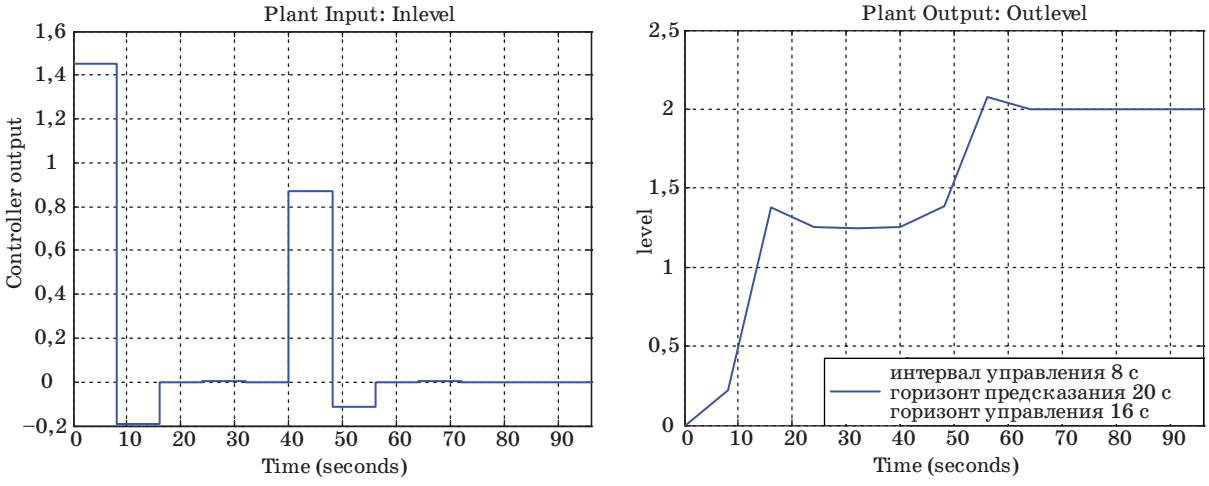


Рис. 1. Переходные характеристики выхода MPC-регулятора и уровня засыпи на колошнике без применения стратегии Blocking

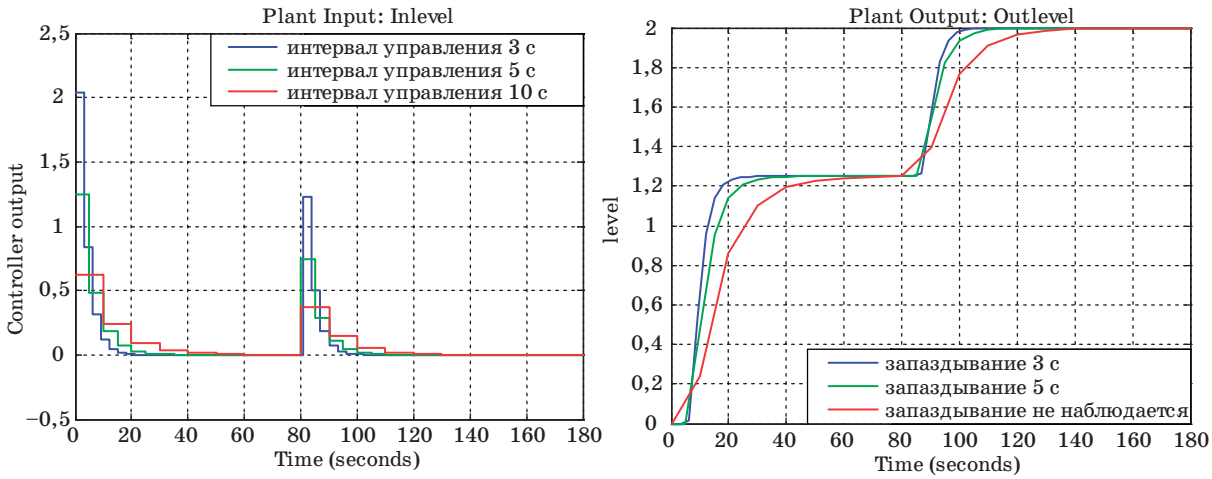


Рис. 2. Переходные характеристики выхода МРС-регулятора и уровня засыпи на колошнике с применения стратегии Blocking

значительном уменьшении интервала управления система становится неустойчивой. Исходя из исследования влияния интервала управления на запаздывание в данной системе, следует выбрать интервал управления, равный 10 с.

Выводы

1. Применение МРС-регулятора требует линеаризации модели темпа загрузки шихты. Операция линеаризации проведена средствами Control Design Tool прикладной программы MATLAB Simulink. Сформированная линейная структура модели темпа загрузки отвечает условию управляемости и наблюдаемости. Данная модель загружена в MPC Toolbox для формирования МРС-управления.

2. Исследования на модели темпа загрузки шихты показали, что интервал управления необходимо выбирать больше времени запаздывания в системе, если необходимо полностью избавиться от задержки в системе. Можно также заметить, что отношение времени запаздывания к времени переходного процесса ни в одном из случаев не превысило 0,1 (большое транспортное запаздывание обычно при данном отношении соответствует 0,2...0,5 [9]).

3. Применение предиктивных регуляторов при решении задач управления системами с запаздыванием оправдано. Введение в систему с чистым запаздыванием МРС-регулятора или предиктора Смита компенсирует влияние задержек поступления управления на объект и позволяет добиться желаемых динамических показателей системы.

4. В том случае, если от системы требуется быстрый переходной процесс и объект управления не является комбинацией большого числа динамических звеньев, более целесообразно использование предиктора Смита. Для этого необходимо точное определение времени задержки и удовлетворительная модель объекта управления.

5. Если же модель объекта достаточно сложная нелинейная, имеет транспортные запаздывания по каналам управления и возмущения, значения которых могут изменяться в силу технологических особенностей процесса, а также если на систему наложены ограничения и необходимо учитывать погрешности датчиков, то более целесообразно применить МРС-регулятор. Алгоритм расчета МРС-метода требует значительных ресурсов, но, тем не менее, он хорошо справляется с поставленной задачей. Тем более что встроенные в систему управления процессами SIMATIC PCS7 функции усовершенствованного управления процессами (Advanced Process Control, APC), которые математически описывают даже сложные взаимосвязи параметров процесса, реализуют прогнозное управление MPC [10].

Библиографический список

1. Система автоматического управления с запаздыванием / Ю. Ю. Громов, Н. А. Земской, А. В. Лагутин и др. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007. 76 с.

2. *Готлиб А. Б.* Доменный процесс. М.: Металлургия, 1966.

3. *Быкова А. М., Жукова Н. В.* Система автоматизации управления темпом загрузки доменной шихты // Завалишинские чтения: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2016. С. 21–23.

4. *Еремеев В. В., Сотникова М. В.* Пособие Model Predictive Control Toolbox [Электронный ресурс]. URL: http://matlab.exponenta.ru/modelpredict/book1/0.php.

5. Википедия: свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/

wiki/Управление_с_прогнозирующими_моделями.

6. Mathwork [Электронный ресурс]. URL: http://www.mathworks.com/help/mpc/gs/plant-models-with-delays.html?searchHighlight = Design%20Controller%20for%20Plant%20with%20Delays&s_tid = doc_srchtitle.

7. *Мерцалова А.* Метод управления с использованием прогнозирующей модели [Электронный ресурс]: Автоматизация и информационные технологии в энергетике // Электрон. журн. М., 2011. URL: http://www.avite.ru/stati/metod-upravleniya-s-ispolzovaniem-prognoziruyuscheymodeli.html.

8. Liuping Wang. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. London: Springer-Verlag London Limited, 2009.

9. *Денисенко В. В.* ПИД-регуляторы: вопросы реализации // СТА. 2008. № 1. Ч. 2. С. 86–99.

10. Система управления процессами SIMATIC PCS7 [Электронный ресурс]. URL: http://armatinal.ru/assets/files/doc/Sistema-upravleniya-processami-SIMATIC-PCS7.pdf.

УДК 621.38

И. Г. Криволапчук[1]
старший преподаватель

Н. В. Решетникова[2]
ассистент
[1,2]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПЗУ В NI MULTISIM™

В статье рассматриваются варианты применения постоянных запоминающих устройств и вопросы, связанные с реализацией моделей в системе NI Multisim™.
Ключевые слова: *ПЗУ, цифровая симуляция, модель.*

I. G. Krivolapchuk[1]
Senior Lecturer

N. V. Reshetnikova[2]
Assistant
[1,2]*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ROM SIMULATION WITH NI MULTISIM™

This article describes some approaches to ROM-based devices simulation with NI Multisim™ system. The usage of universal digital chip model and code-level model are viewed.
Keywords: *ROM, XSPICE, codemodel.*

Процесс разработки сколько-нибудь сложного электронного устройства обязательно включает в себя этап макетирования, позволяющий проверить общую работоспособность устройства, выявить и устранить схемные ошибки, оптимизировать исходную схему. Некоторым недостатком чистого макетирования является то, что при разработке относительно сложного, но штучного изделия макет вносит существенный вклад в общую стоимость разработки. В первую очередь это относится к схемам с использованием дорогостоящих одноразовых элементов, то есть элементов, чья функциональность не может быть в полной мере восстановлена до исходной при демонтаже и при последующем повторном использовании.

Существенно улучшить ситуацию помогло появление симулятора электронных схем общего назначения SPICE, разработанного в Electronics Research Laboratory Калифорнийского университета в Беркли. Стоит отметить, что абсолютное большинство современных средств проектирования электронных схем базируется на версии SPICE3f5 данного симулятора. Широкому распространению SPICE способствовала не только его функциональность, но и доступность и открытость исходного кода, что дало толчок появлению таких расширенных вариантов симулятора, как XSPICE[1] (Технологический институт Джорджии), поддерживающего работу со смешанными аналого-цифровыми моделями. Именно этот вариант используется в системе NI Multisim™ [2] в качестве ядра моделирования.

Запоминающие устройства различных типов и технологий являются неотъемлемой частью вычислительных устройств. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ), как следует из названия, в первую очередь предназначены для долговременного хранения программного кода. В перезаписываемых ПЗУ могут сохраняться, например, промежуточные результаты работы или конфигурационная информация микропроцессорной системы. Однако эксплуатационные свойства ПЗУ позволяют значительно расширить область их применения, используя в качестве основы для построения различных цифровых и цифроаналоговых устройств.

Одним из наиболее частых применений микросхем ПЗУ является замена ими сложных или громоздких комбинационных схем. Такая замена позволяет не только упростить проектируемое устройство за счет уменьшения количества кор-

пусов микросхем, но и в ряде случаев увеличить быстродействие и уменьшить потребляемый ток.

Суть подобной замены сводится к следующему. Адресные входы микросхемы ПЗУ рассматриваются в качестве входов комбинационной схемы, разряды данных – как выходы этой комбинационной схемы. Можно сформировать любую желаемую таблицу истинности комбинационной схемы, составляя соответствующим образом таблицу прошивки запоминающего устройства. При такой реализации схемы разработчик избавлен от необходимости подбора элементов и оптимизации их соединений. Важно только соблюдать соотношение между количеством требуемых адресных входов и разрядностью шины данных выбранного ПЗУ. При необходимости микросхемы ПЗУ могут каскадироваться.

В качестве примера рассмотрим построение распределителя импульсов управления 3-фазным мостом для питания бесконтактного двигателя постоянного тока. Работу устройства иллюстрирует диаграмма входных и выходных сигналов (рис. 1). Входными сигналами схемы являются сигналы датчика положения ротора двигателя – A, B и C, выходными – сигналы управления верхними (H1, H3, H5) и нижними (L2, L4, L6) ключами моста. Из диаграммы видно, что в простейшей реализации устройство состоит из шести идентичных каналов, различающихся только комбинацией прямых и инверсных входных сигналов, и может быть построено на основе составных элементов 4И-2ИЛИ и элементов НЕ. В номенклатуре выпускаемых микросхем требуемые элементы отсутствуют, что приводит к необходимости замены их комбинацией более простых элементов или адаптации имеющихся ближайших аналогов 4И-2ИЛИ-НЕ (1533ЛР4, SN74LS55). В любом случае изначально простая схема будет усложняться за счет добавления дополнительных элементов.

Реализация устройства на базе ПЗУ позволяет не только сократить количество корпусов микросхем до одного, но и расширить его функциональность, дополнив комбинацией управляющих сигналов для реверсивного вращения двигателя. В качестве основы для построения устройства может быть использована микросхема 82S23 (155РЕ3), представляющая собой однократно программируемое ПЗУ с организацией 32x8 бит и имеющая 5 адресных входов и 8 разрядов данных. Прошивка ПЗУ, соответствующая расширенной диаграмме сигналов, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Карта прошивки ПЗУ распределителя импульсов

Адрес	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
00	00	21	06	24	18	09	12	00	00	12	09	18	24	06	21	00
10	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

Среди других важных применений ПЗУ можно назвать построение на их основе генераторов сложных последовательностей цифровых импульсов, генераторов аналоговых сигналов произвольной формы, функциональных преобразователей. Такие устройства широко используются в различных измерительных системах, системах автоматики, системах управления индикаторами и т. п. Еще одним интересным применением ПЗУ является создание микропрограммных автоматов, позволяющих реализовывать достаточно сложные и гибкие алгоритмы управления.

При попытке моделирования описанных выше и подобных им устройств в среде NI Multisim™ пользователь сталкивается с определенными трудностями, связанными с отсутствием доступных штатных инструментов для записи информации в моделируемые запоминающие устройства. Далее будет рассмотрено несколько методов использования базовых и расширенных возможностей, предоставляемых системой моделирования, позволяющих решить поставленную задачу.

Редактирование на лету. Этот метод основан на том факте, что для каждого элемента схемы, имеющего в своей основе базовую модель запоминающего устройства d_ram или d_rom, симулятор автоматически создает окно просмотра и редактирования содержимого. Режим редактирования будет доступен при переводе симулятора в состояние паузы. Рис. 2 иллюстрирует процесс редактирования «прошивки» микросхемы ПЗУ.

Будучи предельно простым, этот метод обладает существенным недостатком, серьезно ограничивающим его применение. Данные, помеща-

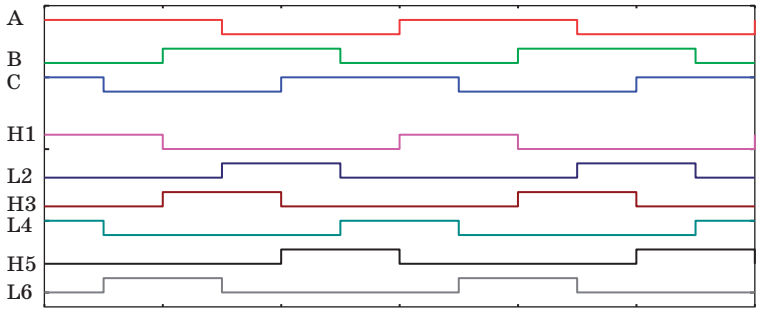


Рис. 1. Диаграмма сигналов распределителя импульсов БДПТ

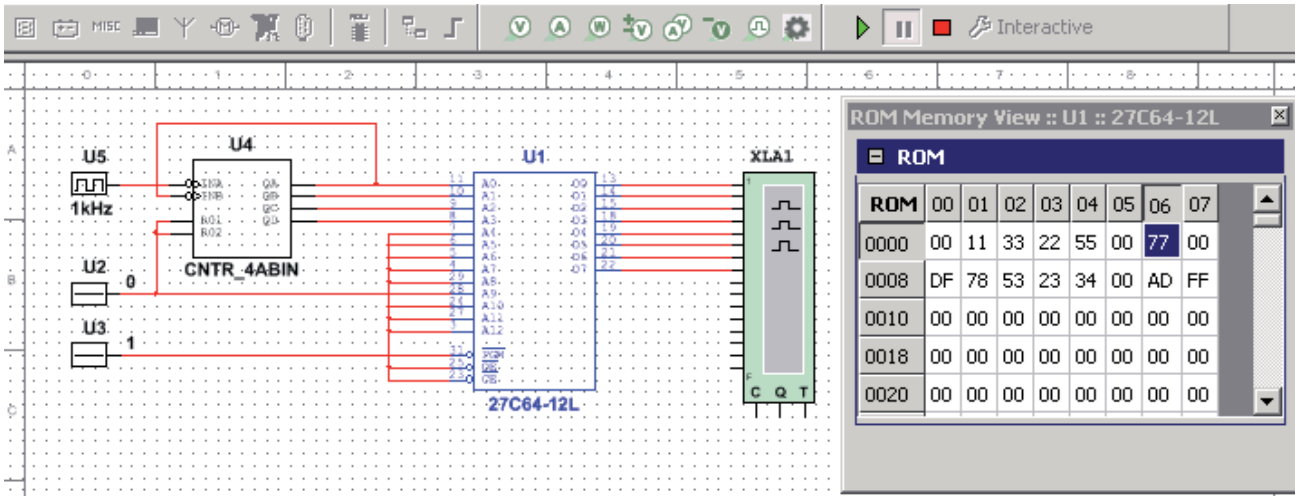


Рис. 2. Редактирование содержимого ПЗУ

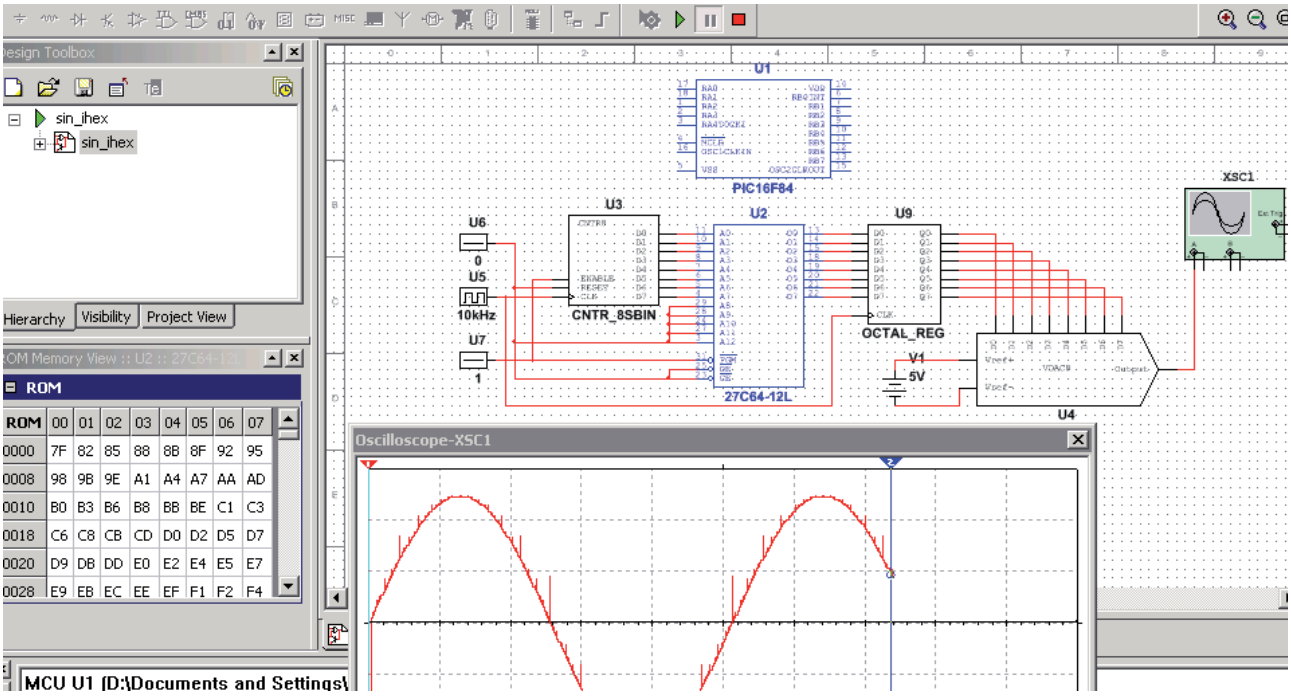


Рис. 3. Генератор сигналов на базе ПЗУ

емые в запоминающее устройство, сохраняются только на время активации режима моделирования. Любое изменение схемы или прерывание моделирования приводит к необходимости повторного программирования ПЗУ. Рекомендовать к использованию этот метод можно только в случае работы с небольшими, не более нескольких десятков байт, размерами памяти. Окружающая устройство памяти схема может быть как чисто цифровой, так и комбинированной. Первое предпочтительнее, так как из-за используемых в этом случае алгоритмов моделирования вероятность сбоя значительно ниже.

Использование фэйкового микроконтроллера. Добавление микроконтроллера к моделируемой схеме без его подключения позволяет воспользоваться всеми возможностями, которые система предоставляет при моделировании устройств на базе микроконтроллеров [3]. В этом случае во вспомогательном диалоге создания проекта (MCU Wizard) необходимо выбрать опции использования внешнего файла прошивки и пустого проекта. Далее в созданном проекте через MCU code manager указывается, что прошивка будет загружаться во внешнее ПЗУ. Подготовленный в формате Intel HEX файл прошивки помещается в каталог проекта.

При запуске моделирования данные из файла будут автоматически загружены в выбранное ПЗУ. Так же, как и в предыдущем методе, в режиме паузы доступно окно просмотра и редактирования. Производимые изменения не сохраняются при пе-

резапуске процесса моделирования, поэтому все вносимые изменения должны быть перенесены в файл прошивки с последующей его заменой в каталоге проекта. Пример использования фэйкового микроконтроллера представлен на рис. 3.

К недостаткам метода можно отнести потребление определенных временных ресурсов присутствующим микроконтроллером и невозможность одновременного использования нескольких микросхем ПЗУ в одном проекте. При моделировании схемы с несколькими запоминающими устройствами и, следовательно, с несколькими микроконтроллерами, указанные недостатки могут оказать заметное воздействие на скорость моделирования. Определенным бонусом метода является возможность использования инструментов разработки программного кода микроконтроллеров, например, конвертера форматов, для формирования файлов прошивок.

Представленные методы моделирования используют исключительно базовые возможности системы. Методы, описываемые ниже, опираются на расширения симулятора и предполагают наличие у пользователя навыков создания моделей для NI Multisim™ и умения создавать программы на языке С.

Пользовательская модель, как и все встроенные в симулятор модели, представляет собой комбинацию визуального элемента – изображения элемента на схеме и функционального наполнения, описывающего поведение модели. Визуальный элемент (ВЭ), кроме собственно изображения и описания выводов, может содержать в себе элементы анимации, позволяющей визуализировать режимы работы или состояние модели. Для создания и редактирования ВЭ используется инструмент SymEditor, входящий в базовый набор программных средств NI Multisim™. Процесс создания ВЭ рассмотрен в [2, 5].

Содержание функциональной части модели зависит от типа моделируемого элемента и возможностей, вкладываемых в модель разработчиком. Минимальное содержание представляет собой шаблон для включения элемента в структуру SPICE-модели. Описание работы элемента может быть выполнено с использованием языка SPICE или через ссылку на внешнюю dll-библиотеку, содержащую программную реализацию модели элемента [6].

Применение универсального цифрового элемента. Универсальный цифровой элемент – d_chip – является элементом, специфичным именно для версии XSPICE, используемой в NI Multisim™. Он представляет собой средство моделирования произвольной комбинационной логики, поведение которой описывается таблицей истинности. Также имеется частичная поддержка последовательностных логических схем. Особенностью данного элемента является передача описания поведения схемы через строку параметров, что позволяет одновременно использовать в схеме несколько однотипных моделей на базе d_chip с различным поведением.

Основными командами, используемыми при моделировании ПЗУ через d_chip, являются /input, /output и /table. Две первые команды служат для описания связей входных и выходных сигналов внутри d_chip с внешними выводами модели, команда /table задает таблицу истинности элемента. Представленный код модели описывает ПЗУ с прошивкой, реализующей рассмотренный выше распределитель импульсов управления для БДПТ.

```
.MODEL myROM  d_chip ( behaviour= "
+;6 step encoder
+;        C  B  A  Dir
+/inputs  A2 A1 A0 A3
+;        H1 L2 H3 L4 H5 L6
+/outputs D0 D1 D2 D3 D4 D5
+/table 13
+;
+; C B A  Dir  1 2 3 4 5 6
+; forward
+  H L H   L   H L L H L L
+  L L H   L   H L L L L H
+  L H H   L   L L H L L H
+  L H L   L   L H H L L L
+  H H L   L   L H L L H L
+  H L L   L   L L L H H L
+; backward
+  L H H   H   L L L H H L
+  L H L   H   H L L H L L
+  H H L   H   H L L L L H
+  H L L   H   L L H L L H
+  H L H   H   L H H L L L
+  L L H   H   L H L L H L
+; disable
+  X X X   X   L L L L L L
+" )
```

В этом примере адресные входы ПЗУ A0-A2 и A3 подключаются к выходам датчика положения ротора (A, B, C) и задатчику направления вращения (Dir) соответственно. Управляющие сигналы снимаются с выводов данных D0-D5. Значки ‹+› в начале строк служат для объединения отдельных строк в одну, ‹;› обозначают строки комментариев. Рис. 4 иллюстрирует работу модели.

Преимуществом подобной реализации модели ПЗУ является сравнительная простота как ее создания, так и модификации прошивки. Несмотря на отсутствие возможности непосредственного просмотра и редактирования содержимого памяти в процессе моделирования, прошивка может быть легко модифицирована как встроенным редактором моделей, так и будучи скопированной во внешний текстовый редактор. Также к положительным свойствам можно отнести хорошую читаемость модели и возмож-

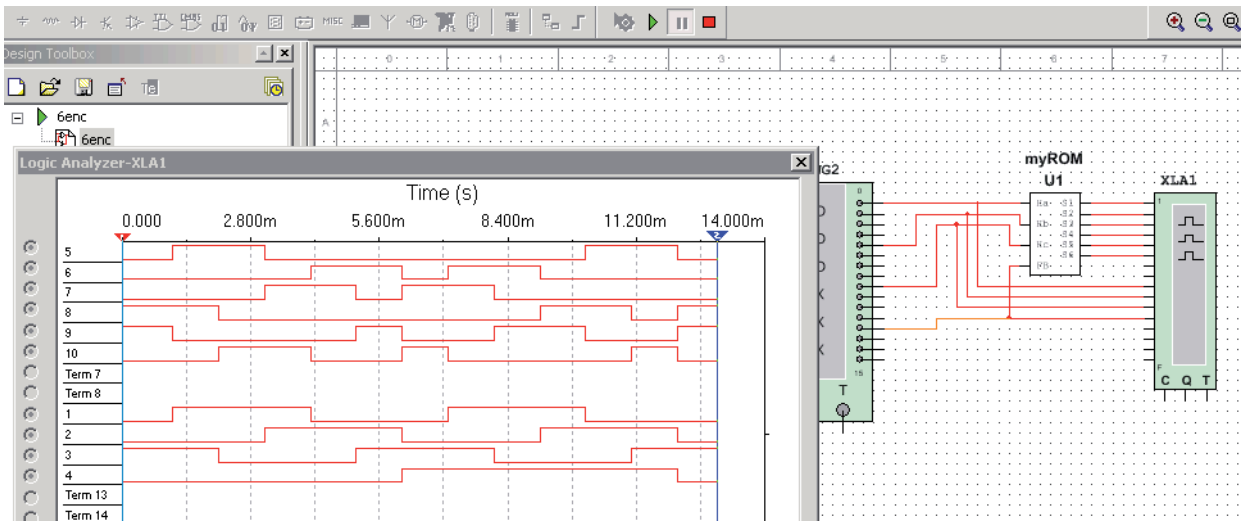


Рис. 4. Реализация распределителя импульсов на базе ПЗУ

ность ее автоматической генерации с использованием скриптовых языков. Недостатки данного типа моделей в основном сводятся к битово-ориентированной записи прошивки и сравнительно большому времени обработки больших последовательностей при случайном доступе.

Разработка внешнего подключаемого программного модуля [6]. Данный подход является наиболее универсальным по своим возможностям, но при этом достаточно сложным по реализации и в значительной мере избыточным. Преимуществом метода является получение пользователем полного контроля работы модели ПЗУ, возможности свободного создания, модификации и загрузки прошивки в любом удобном формате. В случае грамотно разработанного программного кода модель будет потреблять минимальное процессорное время для обработки матрицы памяти произвольного объема и организации. Серьезными недостатками являются сложность отладки и возможность вызвать крах системы моделирования при программных сбоях. Рекомендовать к использованию данный метод можно только для очень опытных пользователей, хорошо представляющих себе функционирование системы моделирования и взаимосвязь ее компонентов.

В качестве заключения следует отметить, что NI Multisim™ предоставляет весьма широкий набор инструментов и средств [5], позволяющий пользователю, пусть и не всегда очевидным образом, адаптировать возможности системы под решение конкретных задач.

Библиографический список

1. XSPICE Software User's Manual. Computer Science and Information Technology Laboratory. Georgia Tech Research Institute, 1992.

2. NI Multisim™ User Manual, 374483D-01, National Instruments Corporation. January, 2009.

3. Multisim™ MCU Module User Guide, 374486A-01, National Instruments Corporation. January, 2007.

4. Multisim™ SPICE Reference Manual, 374845A, National Instruments Corporation.

5. *Криволапчук И. Г.* О создании анимированных моделей в NI Multisim™ // Завалишинские чтения'2014: сб. докл. / СПб.: ГУАП, 2014. С. 78–82.

6. Code-Level Modeling in XSPICE: Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS '92) / F. L. Cox, W. B. Kuhn, J. P. Murray, S. D. Tynor. 10–13 May, 1992. Vol. 2. P. 871–874.

7. *Новиков Ю. В.* Введение в цифровую схемотехнику: учеб. пособие / М.: Интернет-университет информ. технологий: БИНОМ. Лаб. знаний, 2007. 343 с.

УДК 004.891.3

П. С. Ларин
старший научный сотрудник, старший лейтенант
1-я научная рота ВМФ

М. О. Новиков
специалист, оператор научной роты
1-я научная рота ВМФ

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КЯЭУ ПОСРЕДСТВОМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

В статье описывается необходимость применения и совершенствование систем информационной поддержки оператора корабельной ядерной энергетической установки (КЯЭУ). Приведены показатели качества функционирования и методы идентификации функционального состояния КЯЭУ. Сделан вывод о возникновении трудностей при идентификации функционального состояния КЯЭУ обычными способами. Выработаны рекомендации по их преодолению путем использования коэффициентов режимно-потенциальной избыточности (РПИ).

Ключевые слова: *корабельные ядерные энергетические установки (КЯЭУ), экспертная система, система информационной поддержки, показатели качества функционирования, идентификация функционального состояния, режимно-потенциальная избыточность.*

P. S. Larin
Senior Research Employee, Senior Lieutenant
1st Research Company Navy

M. O. Novikov
Specialist, Operator of a Research Company
1st Research Company Navy

IDENTIFICATION OF A FUNCTIONAL CONDITION OF SNPS BY MEANS OF INTELLECTUAL PROGRAM SYSTEMS

In article need of application and improvement of systems of information support of the operator of ship nuclear power station (SNPS). Indicators of quality of functioning and methods identification of a functional condition of SNPS. The conclusion is drawn on emergence of difficulties at identification of a functional condition of SNPS in the usual ways. Recommendations about their overcoming by use of coefficients of regime-potential redundancy.

Keywords: *ship nuclear power stations (SNPS), expert system, system of information support, indicators of quality of functioning, identification of a functional condition, the regime-potential redundancy.*

На атомных подводных лодках (ПЛА) от поколения к поколению происходит рост степени автоматизации главной энергетической установки (ГЭУ), в связи с чем уменьшается доля непосредственного участия обслуживающего персонала в управлении установкой. Таким образом, снижается степень готовности операторов к выполнению противоаварийных действий.

Данное обстоятельство свидетельствует о наличии довольно сложной и вполне объективной проблемы, связанной с обеспечением борьбы за живучесть технических средств. Для преодоления сложившейся ситуации на кораблях ВМФ появляются надежные и эффективные средства вычислительной техники. Происходит разработка систем информационной поддержки (СИП) в помощь обслуживающему персоналу. Такие системы призваны анализировать состояние ГЭУ в аварийных и повседневных ситуациях и вырабатывать соответствующие рекомендации, выступая «советчиком» или же «экспертом».

В системах информационной поддержки выработка рекомендаций по управлению установкой осуществляется за счет блоков (модулей) идентификации функционального состояния. Однако их разработка сопряжена с большими трудностями из-за сложности КЯЭУ, которой свойственны многофункциональность, многорежимность, наличие множества систем и элементов, множества контролируемых параметров, зависимость качества функционирования от параметров внешней среды и т. д.

Сам процесс идентификации заключается:

– в определении истинных значений изменяющихся физических величин и связанных с ними параметров;

– сопоставлении полученных значений с некоторыми критериями;

– выработке (принятии) решения о необходимости каких-то изменений в объекте управления или в управляющей системе.

Однако в работах В. А. Еременко [1] она определяется как представление объекта управления и управляющей системы в виде математических моделей.

Идентификация функционального состояния производится по так называемым показателям качества функционирования (ПКФ), которые закладываются при проектировании КЯЭУ для получения необходимых тактико-технических характеристик (ТТХ). При этом под ТТХ понимается как совокупность характеристик, непосредственно влияющих на боевую эффективность ПЛА (скорость полного хода, скрытность, дальность плавания, автономность и т. д.), так и характеристик, влияющих на показатели эффективности косвенно (тип и характеристики паропроизводящей установки, электроэнергетической системы, удобство технического обслуживания и ремонта, эргономичность и т. д.). Номенклатура ПКФ определена нормативно-техническими документами военно-морского флота. Однако при всем их многообразии наибольшее влияние на управление ПЛА оказывают: способность к выполнению назначения, надежность, живучесть, безопасность, экономичность, маневренность и конструктивные показатели. При идентификации и оптимизации данных параметров нам необходимо получить оптимальное сочетание высоких показателей скрытности, надежности и живучести.

Для облегчения задачи все многообразие ПКФ объединяют в 5 групп показателей назначения, каждая из которых насчитывает целый ряд более частных показателей: состав установки, внешние условия применения по назначению, маневренность, автоматизированность и способность к обеспечению требуемого хода ПЛА [2].

На данный момент существуют следующие методы идентификации функционального состояния:

1. На основе иерархической системы контроля с использованием вероятностно-информационной модели установки.

2. Метод определения состояния многомерных объектов на основе временных факторов.

3. Методы, основанные на интеллектуальных программных системах различных типов.

В первом методе модель нормального функционирования корабельных энергетических установок рассматривается как нелинейная стохастическая динамическая система. Она была предложена В. А. Колесником и Л. А. Промысловым. При отсутствии сбоев модель описывается двумя векторными дифференциальными уравнениями:

$$X_{(k+1)} = \Phi_{(k+1,k)} X_{(k)} + G_{(k+1,k)} W_{(k)};$$

$$Y_{(k)} = H_{(k)} X_{(k)} + \rho_{(k)} V_{(k)};$$

где

– $X_{(k)}$ – s-мерный вектор состояний системы;

– $\Phi_{(k+1,k)}$ – переходная матрица системы размером $S \times S$;

– $G_{(k+1,k)}$ – переходная матрица возмущений системы размером $S \times R$;

– $W_{(k)}$ – случайный H-мерный вектор гауссовских возмущений с нулевым средним и корреляционной матрицей – $E[W_{(k)}, W_{(j)}] = Q_{(k)}\rho_{(k,j)}$;

– $Y_{(k)}$ – n-мерный вектор наблюдений;

– $H_{(k)}$ – матрица наблюдений размером $N \times S$;

– $\rho_{(k)}$ – матрица шумов измерений размером $N \times M$;

– $V_{(k)}$ – случайный m-мерный вектор гауссовских шумов измерений с нулевым средним и корреляционной матрицей – $E[V_{(k)}, V_{(j)}] = R_{(k)}\rho_{(k,j)}$;

$Q_{(k)}$ и $R_{(k)}$ – ковариационные матрицы;

$$\rho_{k,j} = \begin{cases} 1 & k = j \\ 0 & k \neq j \end{cases} \text{ – символ Кронекера.}$$

Учет стохастических внешних и внутренних воздействий на процесс функционирования системы производится заданием модели «сбоев». Под сбоем системы понимается перемещение ее вектора состояний к одной из границ предельного уровня ПКФ, определяющих область нормальной работы системы.

Проявление сбоя в виде изменения корреляционной структуры помех свидетельствует о выходе подсистемы из нормального режима функционирования и позволяет прогнозировать ожидаемый отказ одного из ее блоков. Диагностика таких сбоев осуществляется на основе специальных диагностических карт и каталогов.

Данный метод требует определения границ предельного уровня ПКФ, характеризующих область нормальной работы КЯЭУ, что является очень сложной задачей, т. к. границы постоянно подвижны и зависят от параметров внешней

среды, характера задач, решаемых кораблем, и т. п. О способах учета этого важнейшего момента авторы умалчивают. Представляется проблематичным возможность отображения множества весьма разнообразных параметров функционирования подсистем КЯЭУ с помощью малого числа обобщенных параметров. Авторы ничего не говорят о физическом смысле последних, что вызывает сомнение в работоспособности предлагаемой системы в масштабе реального времени.

Второй метод разработан О. В. Шкановым [3]. В данном случае состояние КЯЭУ характеризуется обобщенным показателем «ресурс». Однако под ресурсом понимается закладываемый при проектировании и строительстве установки запас характеристик и параметров, определяющий продолжительность работы установки от начала эксплуатации до достижения предельного состояния.

Идея заключается в том, что скорость выработки имеемых запасов и, соответственно, время достижения предельного состояния существенно зависят от параметров режима работы технических средств и условий окружающей среды.

Предполагается, что в каждый конкретный момент времени текущее состояние КЯЭУ характеризуется относительной величиной износа или фактической наработкой установки, которая может быть отображена с помощью характеристической точки внутри многомерной области, ограниченной поверхностью предельного ресурса (ППР). Таким образом, положением этой точки относительно границ области будет определяться состояние КЯЭУ. То есть чем она ближе к границе ППР, тем опаснее состояние установки и тем меньше запаса времени остается до достижения предельного состояния.

Метод может быть применен при определении сроков технического обслуживания и ремонта технических средств КЯЭУ, однако он малопригоден на ранних стадиях эксплуатации в связи с тем, что характеристическая точка находится на значительном расстоянии от ППР. Не ясно, как оценивается влияние отказов технических средств на скорость выработки ресурса и каким образом будет производиться выбор параметров, определяющих ресурс не только такой сложной системы, как КЯЭУ, но и таких ее подсистем, как главные двигатели, ядерные реакторы (котлы), паропроводы и т. д.

При третьем методе происходит привлечение возможностей искусственного интеллекта, и решение поставленной задачи сводится к теории распознавания образов.

Для реализации процедуры распознавания образов необходимы:

– набор классифицирующих признаков объекта (ситуации, процесса);

– набор соотношений, определяющих каждый класс объектов;

– решающее правило, с помощью которого происходит выбор класса.

Однако при данном методе существует необходимость в обращении к опыту человека (знающего решения поставленных задач) в связи с отсутствием решающего правила и характеристики классов состояний КЯЭУ. Так же можно прибегнуть к помощи интеллектуальных программных систем, моделирующих процессы мышления человека-эксперта, т. е. экспертных систем (ЭС), основанных на его знаниях и оперирующих с моделями этих знаний [4, 5, 6, 7].

Идентификация функционального состояния КЯЭУ, построение ЭС связано с решением двух основных задач – формализацией (моделированием, представлением) знаний и формализацией (моделированием) рассуждений. В научно-технической литературе, посвященной ЭС, эти задачи называются задачами формирования базы знаний (БЗ) и разработкой системы логического вывода, т. е. программы, обеспечивающей выработку решений на основе анализа фактов и правил, хранящихся в БЗ.

При поиске оптимальных решений интеллектуальная деятельность человека может подразделяться на неформализуемую и формализуемую. Неформализуемой называют деятельность, которая происходит с применением каких-то неизвестных нам правил и процедур. К ней относится мышление, интуиция, здравый смысл и т. п. Формализуемой называют такую деятельность, которая выполняется по определенным правилам и может быть описана с помощью математических выражений, изображена в виде графа или алгоритма.

Задачи, связанные с принятием решений, относятся к области неформализуемой деятельности человека, однако могут принимать и формализуемый вид, если только удастся построить соответствующую математическую модель, разработать алгоритм решения задачи и воссоздать программу для электронно-вычислительных машин. Принятие оптимального решения может быть представлено в виде схемы (рис. 1).

Объект проектирования (ОП) обладает рядом количественных и качественных свойств. Если мы хотим ввести в модель объекта не только количественные, но и качественные свойства, то необходимо выразить их с помощью количественных величин, которые можно измерить. Таким образом, в модель ОП включаются только такие его свойства, которые могут быть измерены [8].

При третьем методе невозможен учет многорежимности и многофункциональности систем КЯЭУ и ее элементов в связи со сложностью данной системы и затрудненным определением четких границ предельного уровня ПКФ. Имеет излишне большое количество допущений и ограничений, приводящее к снижению точности моделирования и расчета. Отсутствует возможность решения

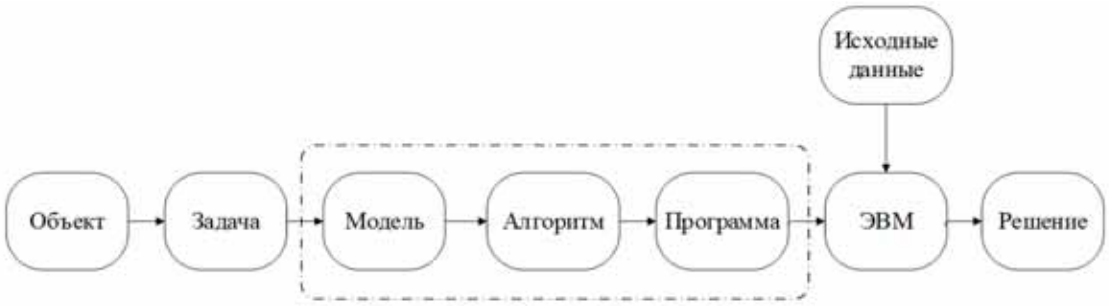


Рис. 1. Схема принятия оптимального решения

задач в режиме реального времени. А также имеется ряд других ограничений, не позволяющих применять данный метод полноценно.

В то же время опытные операторы главной энергетической установки идентифицируют функциональное состояние ее системы с достаточной точностью, используя при работе такие особенности человеческого мышления, как здравый смысл и способность к нечеткому выводу.

Стремление реализовать эти особенности человека привело к разработке математического метода – теории нечетких множеств. ЭС, работающие по этому принципу, получили название нечетких систем [9, 10].

Основы теории нечетких множеств были разработаны профессором Калифорнийского университета США Л. А. Заде. Основой для всех операций служит нечеткая логика, отрицание в которой также называется нечетким. Оно представляет собой бинарную операцию отрицания в нечетком смысле оценки [0, 1], дающую в ответе оценку [0, 1].

Важное место в нечеткой логике занимают приближенные рассуждения или нечеткий вывод. Почти все реально работающие экспертные системы – это либо реляционные системы, использующие нечеткие отношения, либо системы, основанные на нечетких продукционных правилах.

Применение данной теории на практике на порядок снижает количество правил при использовании ЭС, тем самым облегчая процесс приобретения знаний у эксперта. Также улучшает соотношение стоимость/производительность, что является мощным стимулом для разработки нечетких экспертных систем.

При определении способности КЯЭУ к выполнению назначения могут быть применены следующие способы определения нечеткого множества работоспособных (не работоспособных) состояний установки:

1. Введение нескольких границ отклонения параметров работы установки, при которых она продолжает функционирование, но с худшим качеством. Это позволяет учитывать влияние снижения эффективности функционирования, но значительно увеличивает размерность задачи.

2. Введение значений функции принадлежности, каждое из которых равно относительному числу выполняемых в данный конкретный момент времени функций установки (или ее систем). При этом отказ считается наступившим, если число выполняемых функций превысит некоторое определенное значение. Данный подход представляется несколько абстрактным, т. к. не учитывает, например, различную относительную важность функций.

3. Присвоение каждому состоянию установки вероятности ее перехода в данное состояние при данных условиях плавания. Этот подход вполне правомерен, но требует и проведения весьма сложных расчетов и не снимает проблему отнесения тех или иных состояний к отказным или работоспособным.

4. Введение таких значений функции принадлежности, каждое из которых соответствует определенному уровню эффективности функционирования той или иной системы, механизма. Данный подход представляется наиболее перспективным, но требует разработки способов расчета функции принадлежности, которые в настоящее время отсутствуют.

В реальной практике аппарат нечетких множеств пока еще не нашел своего применения.

Таким образом, в настоящее время ни один из известных способов идентификации функционального состояния КЯЭУ не позволяет решать данную задачу с требуемым качеством не только в аварийной обстановке, но даже и в нормальных условиях плавания.

Рассмотрим метод количественной оценки режимно-потенциальной избыточности сложной технической системы [11, 12, 13, 14, 15]. Согласно определению, РПИ – появляющиеся в СТС при работе на промежуточных режимах и (или) при более «комфортных» условиях окружающей среды дополнительные средства и (или) возможности сверх минимально необходимых для сохранения ее качества в данных условиях использования по назначению.

Существуют следующие разновидности режимно-потенциальной избыточности: параметрическая, функциональная, временная, структурная, нагрузочная.

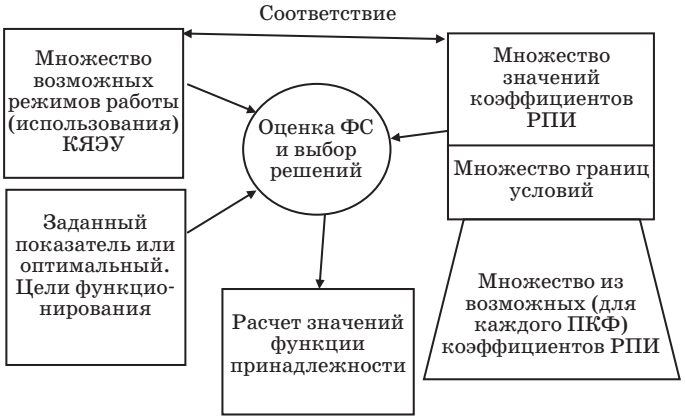


Рис. 2. Определение значений функции принадлежности нечеткого множества

Определение значений функции принадлежности нечеткого множества посредством режимно-потенциальной избыточности можно представить в виде схемы (рис. 2). Вывод об удовлетворительном состоянии функциональной системы и энергетической установки можно сделать только при наличии всех перечисленных видах РПИ.

Использование данного метода количественной оценки обеспечивает учет всего множества факторов, влияющих на функционирование КЯЭУ (скорости хода ПЛА, температуры забортной воды, режимов работы собственного оборудования, наличия различных комбинаций отказов и т. д), позволяя свести сложную задачу идентификации ФС к сравнительно простой – расчету коэффициентов РПИ и проверке их знака. Однако следует отметить, что данный метод по отношению к КЯЭУ достаточно громоздок в связи с многорежимностью и многофункциональностью системы и ее элементов, что осложняет расчеты ПКФ.

При исследовании основных положений теории нечетких множеств было выявлено, что логика определения понятия нечеткого множества не содержит какой-либо нечеткости, и существует возможность использования основных операций и законов нечетких множеств по аналогии с четкими множествами. Также отсутствует необходимость математического формулирования задач с высокой точностью, если существует готовность лишь к нечеткому описанию задачи и имеется возможность решения слабоформализованных задач, включая задачи с лингвистическими переменными.

Основным недостатком, связанным с использованием нечетких множеств на практике, является нахождение значений функций принадлежности с учетом поставленных целей и накладываемых ограничений. Исследования, проведенные в данном направлении, показали, что эффективным методом решения данного вопроса является использование коэффициентов РПИ.

Само определение РПИ подразумевает наличие связи между показателями качества функционирования КЯЭУ и видами РПИ. Как следует из рис. 3, увеличение практически всех видов РПИ ведет к возрастанию надежности, живучести, безопасности, маневренности установки, но одновременно приводит к ухудшению скрытности и экономичности. То есть, зная величину РПИ, можно судить о степени удовлетворения режима работы КЯЭУ требованиям по тому или иному показателю или же о направлении вектора, характеризующего изменение данного ПКФ установки.

В результате научного исследования мы выяснили, что в качестве значений функции принадлежности нечеткого множества различных

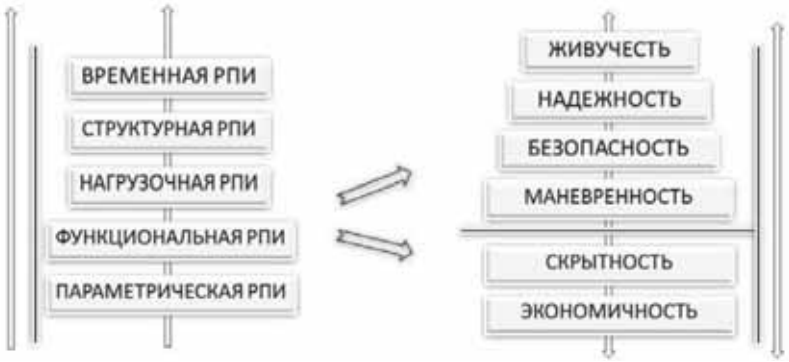


Рис. 3. Соответствие между ПКФ КЯЭУ и видами РПИ

режимов работы КЯЭУ коэффициенты РПИ позволяют в полной мере использовать возможности теории нечетких множеств при идентификации ФС КЯЭУ.

Также метод идентификации ФС КЯЭУ позволяет не только оценивать способность установки к выполнению назначения при любом сочетании условий внешней среды и отказов технических средств, но и производить выбор необходимого в этих условиях режима функционирования установки путем расчета обобщенных критериев функционального состояния КЯЭУ-коэффициентов РПИ.

Таким образом, анализ преимуществ и недостатков метода идентификации, основанного на нечетких множествах, и метода, основанного на расчете коэффициентов РПИ, показал, что объединение этих двух подходов в рамках одного позволит сохранить и даже приумножить все лучшее, что содержится в них, и одновременно исключить большую часть недостатков.

Библиографический список

1. *Еременко В. А.* Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками. Киев: Техника, 1988.

2. *Брахман Т. Р.* Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. М.: Радио и связь, 1984.

3. *Шканов О. В., Березин С. Н., Титаренко А. П.* Оценка состояния судовых технических средств // Судостроение. 1992. № 3.

4. Экспертные системы. Принципы работы и примеры / под ред. Р. Форсайта. М.: Радио и связь, 1987.

5. *Убейко В. М., Убейко В. В.* Экспертные системы в технике и экономике. М.: Изд-во МАИ, 1992.

6. *Башлыков А. А.* Экспертные системы: состояние и перспективы применения в атомной энергетике. Обзорная информация. М.: Информэнерго. Атомные электростанции. Вып. 5, 1989.

7. *Башлыков Л. А., Еремеев А. П.* Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. М.: Изд-во МЭИ, 1994.

8. *Ершов Г. А.* Атомные энергетические установки подводных лодок: учебник. Ч. 1. СПб., 2011.

9. Нечеткие множества и теория возможностей / под ред. Р. Р. Ягера. М.: Радио и связь, 1986.

10. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986.

11. Об использовании метода РПИ в блоке СИП оператора ГЭУ: сб. матер. конф. / Алексеев А. В., Григорьев В. С., Ермакович Ю. Л. и др. // Всерос. науч.-практ. конф., посвященная 200-летию образования Училища корабельной архитектуры Высшего военно-морского инженерного училища им. Ф. Э. Дзержинского: тез. докл. СПб.: ВВМИУ им. Ф. Э. Дзержинского, 1998. Ч. 2

12. Поиск наиболее эффективного метода выбора режима функционирования КАЭУ с использованием вероятностного подхода, метода РПИ и нечеткой логики: сб. матер. конф. / А. В. Алексеев, В. С. Григорьев, Ю. Л. Ермакович и др. // Всерос. науч.-практ. конф., посвященная 200-летию образования Училища корабельной архитектуры Высшего военно-морского инженерного училища им. Ф. Э. Дзержинского: тез. докл. СПб.: ВВМИУ им. Ф. Э. Дзержинского, 1998. Ч. 2.

13. *Лямкин А. Д.* Использование коэффициентов РПИ в качестве значения функции принадлежности: сб. матер. конф. // Межвуз. науч.-теорет. конф.. СПб.: ВМИИИ, 2000. Вып. 2.

14. *Лямкин А. Д.* Возможность использования коэффициентов РПИ в качестве значений функции принадлежности с целью определения способности СТС-КАЭУ к функционированию: сб. матер. Межотраслевой науч.-техн. конф. по актуальным вопросам военного кораблестроения: тез. доклада. СПб.: 1 ЦНИИ МО, 2000.

15. *Лямкин А. Д.* Определение эффективного режима функционирования КАЭУ с использованием коэффициентов РПИ в качестве функций принадлежности нечетких множеств, описывающих цели: сб. матер. Межотраслевой науч.-техн. конф. по актуальным вопросам военного кораблестроения: тез. доклада. СПб.: 1 ЦНИИ МО, 2000.

УДК 681.5

А. Л. Ляшенко
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

И. М. Першин
доктор технических наук, профессор
Южный федеральный университет

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОГРЕЙНЫМ КОТЛОМ

В статье представлено описание системы управления технологических параметров в водогрейном котле. Описана схема конструкции котла. Рассмотрена методика моделирования объектов с распределенными параметрами. Разработана методика математического моделирования распространения тепла в котле. Разработанная методика позволит проводить диагностирование физического состояния энергоблока водогрейного котла.

Ключевые слова: *котел, объекты с распределенными параметрами, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, диагностирование, программно-техническое обеспечение, системный анализ, управление.*

A. L. Liashenko
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

I. M. Pershin
Dr. Sc., Tech., Professor
South Federal University

MODERNIZATION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE HOT WATER BOILER

The article describes the control system for the technological parameters of a hot water boiler. The boiler design is described. The technique of modeling objects with distributed parameters is considered. A methodology for mathematical modeling of heat diffusion is developed. The developed technique will allow to diagnose the physical condition of the power unit of the hot water boiler.

Keywords: *boiler, objects with distributed parameters, differential equation, modeling, control, diagnostics. Software and hardware, system analysis, management.*

Коммунальные и промышленные котельные России потребляют миллионы тонн угля в год. В настоящее время проводится политика перевода угольных котельных на природный газ. При этом постулируется достижение большого экономического и экологического эффекта от такого перевода. Между тем элементарные расчеты показывают, что срок окупаемости затрат на перевод на природный газ котельной, потребляющей, к примеру, 400 т угля в год с низшей теплотворной способностью 20 МДж/кг, составляет более 5 лет без учета амортизационных затрат. С учетом же затрат на амортизацию срок окупаемости затрат приближается к сроку службы теплогенерирующего оборудования, т. е. затраты на газификацию такой небольшой котельной фактически не окупаются, и уголь использовать как топливо для небольших коммунальных котельных оказывается выгоднее, чем природный газ. Однако следует иметь в виду, что коммунальные и промышленные котельные располагаются, как правило, в городах и поселках, где уголь значительно уступает природному газу в плане экологической безопасности [1]. Для того чтобы уголь как топливо для коммунальных и промышленных котельных был конкуренто-

Рис. 1. Водогрейный котел

способным по отношению к природному газу, необходимо, помимо всего прочего, уменьшить его негативное влияние на окружающую среду. В связи с этим рассмотрим перевод котла на сжигание природного газа.

Схема водогрейного котла представлена на рис. 2.

Котел содержит горизонтальный цилиндрический корпус 1, в котором размещена жаровая труба 2, оборудованная водоподъемными трубами 3. К жаровой трубе примыкает пучок коротких дымогарных труб 4, объединенных через заднюю дымовую коробку 7 с пучком длинных дымогарных труб 5, которые, в свою очередь, через переднюю дымовую коробку 8 объединены с дымоходом 6. Штуцера 9 и 10 служат для входа и выхода нагреваемой воды, а амбразура 11 – для установки на котле газовой горелки при переводе котла на сжигание природного газа.

Котел работает следующим образом [2]. Воздух от вентилятора высокого давления нагнетается в воздухораспределительное устройство, на которое вручную или транспортером подается твердое топливо. Топливо сгорает в «полукипящем» слое, а газообразные продукты его сгорания по дымогарным трубам 4, 5 и дымоходу 6 удаляют-

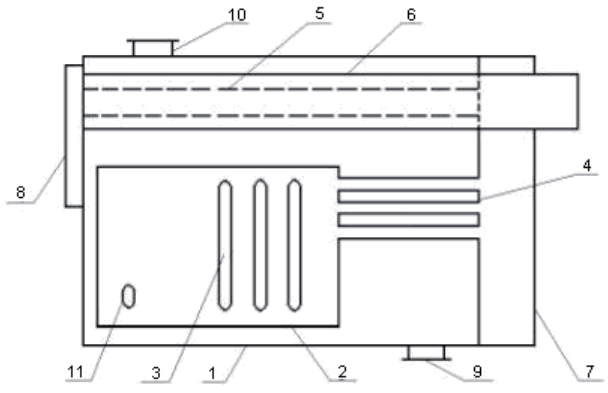


Рис. 2. Схема котла

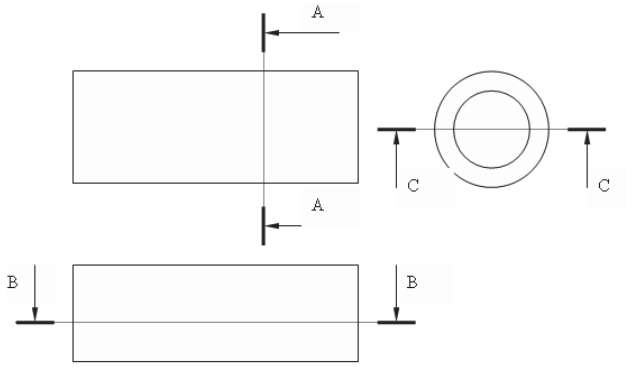


Рис. 3. Вид объекта спереди, сверху и справа

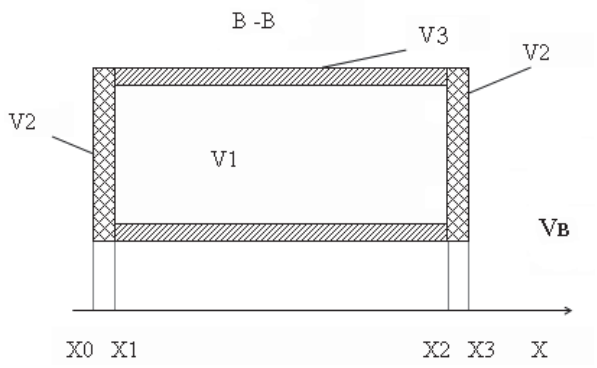


Рис. 4. Разрез В – В: V1 – внутренний объем котла; V2 – объем боковых стенок; V3 – объем стенок корпуса котла; Vв – объем воздуха, окружающего котел

ся из котла. Три хода дымовых газов обеспечивают их глубокое охлаждение циркулирующей через котел водой, а водоподъемные трубы 3 обеспечивают циркуляцию воды вокруг жаровой трубы 2, обеспечивая ее надежное охлаждение.

Перейдем непосредственно к составлению математической модели объекта автоматического регулирования температуры.

Математически перенос тепла внутри твердого тела описывается дифференциальным уравнением теплопроводности. Для того чтобы решить это уравнение и найти температурное поле внутри тела в заданный момент времени, нужно знать распределение температуры в начальный момент времени (начальные условия), геометрическую форму тела, его размеры и закон теплового взаимодействия между поверхностью тела и окружающей его средой.

Составим математическую модель водогрейного котла. Для этого представим котел, ориентированный в цилиндрической системе координат, и три основных вида: спереди, сверху и справа.

Ниже представлен фрагмент математической модели тепловых полей котла.

Систему уравнений теплопроводности для рассматриваемого объекта запишем в следующем виде.

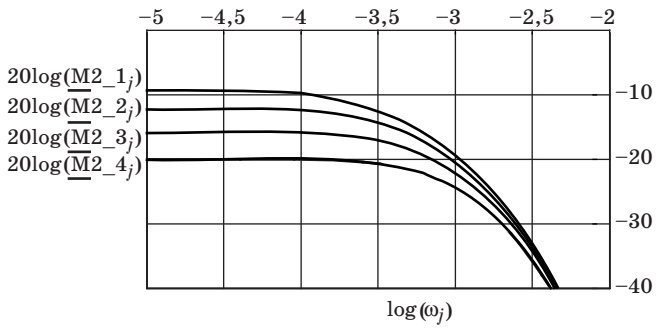


Рис 5. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

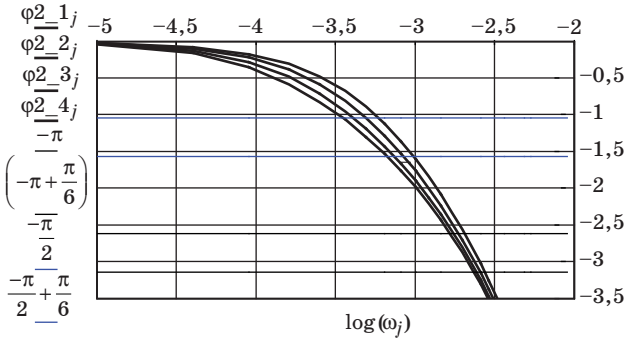


Рис. 6. Логарифмическая фазо-частотная характеристика

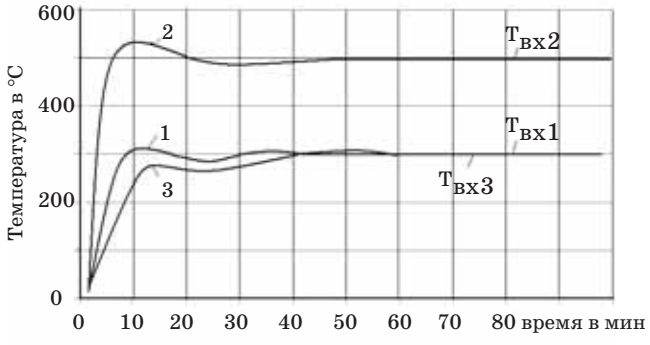


Рис. 7. Графики переходных процессов

Для первой среды (сталь):

$$\frac{\partial T(x,r,\theta,\tau)}{\partial \tau} = a_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T(x,r,\theta,\tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(x,r,\theta,\tau)}{\partial r} + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial^2 T(x,r,\theta,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(x,r,\theta,\tau)}{\partial \theta^2} \right),$$

$$0 < x < Lx, \quad R2 < r < R1, \quad 0 < \theta < 2\pi \cdot r, \quad \tau > 0.$$

Для второй среды (вода):

$$\frac{\partial T(x,r,\theta,\tau)}{\partial \tau} = a_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T(x,r,\theta,\tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(x,r,\theta,\tau)}{\partial r} + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial^2 T(x,r,\theta,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(x,r,\theta,\tau)}{\partial \theta^2} \right),$$

$$0 < x < Lx, \quad 0 < r < R2, \quad 0 < \theta < 2\pi \cdot r, \quad \tau > 0,$$

где x, r, θ – пространственные координаты;

τ – время;

a_1, a_2 – коэффициенты температуропроводности стали и воды соответственно;

$\partial x, \partial r, \partial \theta$ – шаги дискретизации по x, r, θ соответственно, $\partial \tau$ – шаг дискретизации по времени.

Составив полную математическую модель объекта управления, мы можем приступить к проведению численного эксперимента с применением вычислительной техники.

По результатам численного моделирования объекта были построены следующие графики частотных характеристик по выбранному числу пространственных мод.

Произведем синтез распределенного высокоточного регулятора для системы управления объектом [3].

Передаточная функция синтезируемого регулятора имеет вид

$$W(x,r,s) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \times$$

$$\times \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot s,$$

где E_1, E_2, E_4 – коэффициенты усиления; ∇^2 – лапласиан; n_1, n_2, n_4 – весовые коэффициенты.

В результате расчета передаточная функция синтезированного регулятора примет следующий вид:

$$W(x,r,s) = 21{,}4789 \cdot \left[0{,}6759 - 0{,}351 \cdot \nabla^2 \right] + 0{,}00309 \times$$

$$\times \left[0{,}7999 - 0{,}2114 \cdot \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + 199{,}68417 \cdot \left[1 - 0 \cdot \nabla^2 \right] \cdot s.$$

По результатам моделирования замкнутой системы управления построены графики переходных процессов, приведенные на рис. 4.2

Как следует из графиков, система управления осуществляет регулирование процесса с заданными показателями качества.

Подводя итоги, можно сказать, что созданная автоматическая система управления печи с переходом на газ позволит эффективно использовать технологический процесс для получения тепловой энергии.

Библиографический список

1. *Бойко Е. А.* Котельные установки и парогенераторы: учеб. пособие. Красноярск: КГТУ, 2005. 292 с.

2. *Зыков А. К.* Паровые и водогрейные котлы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 129 с.

3. *Першин И. М.* Синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: РИО КМВ, 2002. 212 с.

УДК 004.93+681.518.3:004.932+004.932.2

А. С. Пахунов
ведущий специалист отдела закупок, аспирант АО «РПКБ»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В статье приведен обзор различных способов предварительного грубого совмещения изображений. Рассмотрена возможность использования комплексного контурного анализа для грубого и точного сопоставления изображений. Предлагается подход, который позволит осуществить предварительное грубое совмещение контуров изображения, используя метод корректировки по углу крена.

Ключевые слова: *совмещение изображений, совмещение контуров, комплексный контурный анализ, метод корректировки по углу крена.*

A. S. Pahunov
Leading Specialist of the Purchasing Department,
Postgraduate Student of JSC "RPKB"

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF METHODS OF FUSION IMAGES

The article gives an overview of various methods of preliminary coarse image fusion. The given article reviews methods of preliminary coarse registration image fusion. The possibility of using complex contour analysis for both coarse and accurate image matching is considered. An approach is proposed which will allow preliminary rough alignment of the image contours using the roll angle adjustment method.

Keywords: *image fusion, contour matching, complex contour image analysis, roll angle adjustment method.*

Совмещение реального и синтезированного изображений в бортовых СТЗ является одной из сложнейших задач по нескольким причинам.

Одна из основных причин заключается в ошибках определения текущих координат ЛА как материальной точки в воздушном пространстве (широты λ, долготы φ и высоты h), а также в ошибках определения ориентации ЛА как протяженного объекта в пространстве. К ним относятся ошибки в измерении параметров курса ψ, тангажа θ и крена γ. Ошибки могут присутствовать и в цифровой карте местности (ЦКМ). Как следствие, изображение, синтезированное по ЦКМ при наличии в ней ошибок, будет отличаться от истинного.

Математическая модель, устанавливающая связь навигационных параметров с учетом погрешности с параметрами зоны обзора в плоскости Земли, позволяет сформировать предельную зону обзора. В пределах этой зоны находится реальное изображение (телевизионное, тепловизионное, радиолокационное и т. д.). Знание предельной зоны позволяет организовать целенаправленный перебор ракурсов для формирования синтезированных изображений по цифровой карте местности (ЦКМ) и решения для каждого ракурса задачи совмещения изображений.

Проблема совмещения изображений заключается в установлении соответствия между точками двух или более изображений. Данная проблема является фундаментальной задачей компьютерного зрения, поскольку необходимость совмещения изображений возникает при решении таких задач, как выявление изменений в серии изображений, анализ движения, комплексирование информации от различных датчиков, стереозрение, анализ и распознавание объектов.

Задача совмещения изображений также имеет глубокую связь с задачей распознавания объекта по его изображению, что позволяет переносить общие решения, найденные для одной задачи, на другую. Различные методы совмещения включают в качестве составных элементов выполнение таких операций, как выделение контуров, сегментация и построение структурного описания изображения.

Еще одним источником ошибок в СТЗ могут быть сами сенсоры, формирующие изображение.

Заявленные параметры сенсоров иногда отличаются от их реальных характеристик. Разная

природа реального и синтезированного изображений является еще одной причиной, затрудняющей решение задачи совмещения изображений.

Для совмещения реального и синтезированного изображений необходимо генерировать некоторое множество ракурсов виртуальной карты местности. Под ракурсом будем понимать конкретный набор значений шестимерного арифметического вектора $\upsilon = (x, y, h, \psi, \theta, \gamma)$, вектора параметров позиционирования ЛА. Параметры позиционирования ЛА являются исходными данными для формирования синтезированного изображения по цифровой карте местности.

К ошибкам позиционирования можно добавить еще и геометрические искажения контуров объектов, привносимые в обработанные изображения на этапах выделения границ перепада яркостей и формирования замкнутых контуров. Необходимо учитывать, что изображения одного и того же участка поверхности Земли, снятые из различных точек пространства, отличаются друг от друга еще и проективными искажениями.

Таким образом, возникает задача исследования методов совмещения изображений различной природы, что необходимо для разработки алгоритмов совмещения, работающих в реальном времени. Решение поставленной задачи сводится к поиску на паре изображений одних и тех же объектов, их сопоставлению, вычислению геометрического преобразования одного изображения к плоскости другого и слиянию изображений для отображения пилоту. Ввиду существенной сложности задачи совмещения изображений различной природы в реальном времени целесообразно рассмотреть также методы, обеспечивающие простое и быстрое, но, возможно, недостаточно качественное совмещение. Такие методы будем называть методами предварительного грубого совмещения изображений. Для этих целей будем использовать упрощенные модели геометрических искажений. В результате получим довольно грубый вариант решения задачи совмещения изображений, который можно будет при необходимости уточнять в ходе дальнейшей обработки. В случаях, когда не удается сразу обеспечить точное совмещение изображений из-за особенностей изображений различной природы, может применяться такой двухэтапный подход.

Как для грубого, так и для точного совмещения наиболее эффективным представляется использовать методы сравнения объектов на основе анализа их контуров, поскольку яркости и текстуры могут существенно отличаться на изображениях различной природы, например, на аэрофотоснимке и синтезированном изображении [1].

Контуры основных объектов, как правило, остаются неизменными на изображениях. Контуры на изображениях поверхности Земли могут быть как достаточно простыми, например контуры ВПП, так и более сложными, например контуры берегов реки или моря. Разная природа реального и синтезированного изображений является еще одной причиной, затрудняющей решение задачи совмещения изображений. Гладким контурам береговой линии водоема на синтезированном изображении могут отвечать линии с большей степенью изрезанности на реальном изображении.

Исследование возможности применения методов контурного анализа к сравнению и совмещению контуров на изображениях представляет несомненный интерес. Кроме того, такой подход к совмещению изображений дает возможность разрабатывать алгоритмы реального времени, поскольку алгоритмы обработки векторных контуров имеют более низкую вычислительную сложность, чем алгоритмы непосредственной обработки растровых изображений.

Совмещение двух изображений в соответствии с данной технологией предполагает решение следующих задач:

– выделение границ перепада яркости на изображениях;

– удаление одиночных пикселей и восстановление пропусков в контурах объектов;

– обнаружение замкнутых контуров объектов постоянного присутствия на реальном и синтезированном изображениях;

– переход к векторному описанию контуров и аппроксимация контуров многоугольниками с минимальным числом вершин;

– поиск множества пар ключевых точек на изображениях (на многоугольниках);

– выбор из найденного множества пар ключевых точек подмножества наиболее значимых пар (например, в методе проективной геометрии четырех пар точек для вычисления матрицы гомографии);

– нахождение проективного преобразования и приведение одного изображения к плоскости другого.

Для решения данных задач используются алгоритмы, основанные на комплексном контурном анализе и предварительном грубом совмещении в комплексной плоскости.

Комплексный контурный анализ (ККА) был разработан в первую очередь для автоматического анализа и распознавания текстов [1, 2]. Однако простота и высокая эффективность ККА в распознавании печатных символов позволяет распознавать контуры и на ТВ, на ТПВ и на других изображениях. Особенный интерес представляет применение ККА для совмещения разноспектральных аэрокосмических и синтезированных изображений, поскольку контуры основных объектов на таких изображениях, как правило, сохраняются неизменными, в отличие от их яркостей [3, 4].

Рассмотрим подробно алгоритм корректировки синтезированного изображения по углу кре-

на. Корректировка осуществляется на угол $\Delta\gamma$, который находится как угол между прямыми аппроксимирующими линии горизонта на реальном и синтезированном изображениях.

Высокое качество совмещения изображений достигается с помощью корреляционно-экстремальных методов совмещения. Однако такое совмещение требует недопустимо больших затрат машинного времени, исключающих возможность их применения в реальном времени. Для совмещения реального и синтезированного изображений приходится генерировать некоторое множество ракурсов виртуальной карты местности. Под ракурсом будем понимать конкретный набор значений шестимерного арифметического вектора $\upsilon = (x, y, h, \psi, \theta, \gamma)$ – параметров позиционирования ЛА. Параметры позиционирования ЛА являются исходными данными для формирования синтезированного изображения по цифровой карте местности. Полномасштабная реализация совмещения изображений корреляционно-экстремальными методами требует построения порядка 10^6 ракурсов.

Сокращение размерности пространства перебора ракурсов – один из возможных подходов к достижению требуемых временных характеристик при решении задачи совмещения изображений. Необходимо найти хорошие оценки нескольких – хотя бы двух – параметров в составе вектора v простыми и быстрыми методами. Это позволит использовать для нахождения оптимальных оценок других параметров и корреляционно-экстремальные методы. Простейшим в списке возможных подходов в этом направлении является предложение корректировки синтезированного изображения к плоскости реального изображения по углу крена при условии, что на изображениях выделены линии горизонта.

Грубое совмещение двух изображений, например изображения, полученного от одного из сенсоров, и изображения, синтезированного по цифровой карте, может быть выполнено по линиям горизонта. Для совмещения изображений по линиям горизонта могут потребоваться сдвиги одного изображения относительно другого по одной или по обеим осям (в декартовой прямоугольной системе координат ОХУ), а также поворот одного из двух изображений для совмещения линий горизонта. Преобразования сдвига не вызывают особых затруднений. Сложнее найти параметры преобразования, обеспечивающего поворот изображения. Для этого необходимо найти точку, относительно которой будет осуществляться поворот, и найти угол, на который нужно повернуть одно из двух изображений.

Для выполнения преобразования поворота изображения предлагается использовать параметрическую аппроксимацию линии горизонта совмещаемых изображений линейными функциями [5]. В общем случае аппроксимировать линии горизонта необходимо кусочно-линейными функциями. Корректировка по углу крена по линиям горизонта реального и отвечающего ему синтезированного изображений позволяет сократить число оцениваемых параметров на один.

Достаточно положительные результаты совмещения изображений дает метод, базирующийся на поиске некоторого множества соответствующих пар ключевых точек на сравниваемых изображениях и нахождении преобразования, приводящего одно изображение к плоскости другого [6].

Метод, основанный на использовании матрицы гомографии, обладает достаточно низкой вычислительной сложностью, и, значит, по этому критерию его можно было бы включать в состав математического обеспечения реальных СТЗ ЛА. Недостатком метода является сильная зависимость качества совмещения изображений от того, насколько удачно были выбраны пары ключевых точек на совмещаемых изображениях [7, 8]. Кроме того, в рамках данного метода не решена пока обратная задача – получение оценки вектора ошибок навигационных параметров $\Delta\upsilon = (\Delta x, \Delta y, \Delta h, \Delta\psi, \Delta\theta, \Delta\gamma)$. Эта оценка необходима для корректировки навигационных параметров.

Предлагаемый подход позволяет осуществить предварительное грубое совмещение контуров на тех же идеях ключевых точек. Основные отличия предлагаемого метода от метода, основанного на использовании матрицы гомографии, заключаются в следующем [9]. Во-первых, для реализации этого метода необходима лишь одна пара ключевых точек. Во-вторых, он позволяет в процессе совмещения изображений (контуров) получить предварительные оценки трех из шести компонент вектора ошибок навигационных параметров v. Предлагаемый алгоритм предварительного грубого совмещения состоит из нескольких шагов. Рассмотрим основные шаги алгоритма.

На первом этапе осуществляется аппроксимация контуров основных объектов на реальном и синтезированном изображениях многоугольниками. В нашем случае это контуры реки. Аппроксимирующие многоугольники должны содержать минимальное число вершин (угловых точек), но при этом достаточно точно повторять контуры объекта. Эти требования противоречивы, поэтому к их конкретному описанию предъявляются особые требования.

Поиску уголковых структур на векторных изображениях посвящен ряд работ. В [10] для детектирования углов на изображении в каждой точке обрабатываемого контура производится аппроксимация участков контура отрезками, образующими уголковую структуру. Параметры пары линейных функций находятся методом наименьших квадратов. Затем находится квадратичная ошибка аппроксимации контура углом, вычисляется значение критерия X^2, с по-

мощью которого находится вероятность p_1 гипотезы о том, что данный участок контура является уголком. После этого оценивается противоположная гипотеза о том, что данный участок является плавно изменяющейся кривой. Для получения ответа на этот вопрос осуществляется аппроксимация рассматриваемого участка контура полиномом третьей степени. Вновь вычисляются квадратичная ошибка аппроксимации, значение критерия X^2 и находится вероятность p_2 противоположной гипотезы. Из сравнения полученных значений p_1 и p_2 вероятности гипотез делается вывод, какая из них правдоподобнее.

Результаты экспериментальных исследований метода на реальных изображениях говорят о хорошем качестве детектирования углов и, в частности, на зашумленных изображениях. Очевидный недостаток метода кроется в высокой вычислительной сложности, не позволяющей использовать его в реальных СТЗ на борту летательного аппарата.

Вопрос оценки качества совмещения реального и синтезированного изображений имеет важное самостоятельное значение. От качества совмещения реального и синтезированного изображений зависит точность пересчета параметров пространственного и углового позиционирования сенсоров, а также адекватность и эргономичность восприятия комбинированного изображения экипажем. Поэтому важно количественно оценить степень (качество) совмещения изображения для принятия решения о возможности использования результатов совмещения изображений для КЭНС и визуализации экипажем.

Библиографический список

1. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / А. Я. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев и др. М.: Физматлит, 2003. 592 с.

2. *Forsyth D. A. and Ponce J.* Computers Vision: A Modern Approach. N. Y.: Prentice-Hall, 2011. 792 p.

3. *Анисимов В. В., Курганов В. Д., Злобин В. К.* Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высш. шк., 1983. 295 с.

4. Contour Analysis Application for Object Detection in Aerial Image Sequence / V. A. Sablina, A. I. Novikov, M. B. Nikiforov, A. A. Loginov // 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO): proceedings. Budva, Montenegro, 2014. P. 102–107.

5. *Муратов Е. Р.* Совмещение телевизионных изображений и виртуальной модели местности в плоскости крена // Изв. ТулГУ. Сер. техн. науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч. 1. Вып. 9. С. 253–260.

6. *Sablina V. A., Novikov A. I., Nikiforov M. B.* Geometric Transformations for the Map Image Super Imposition with the Aerial Photograph // Proceedings of the VIII International Scientific and Information Technologies (CSIT). Lviv, Ukraine, 2013. P. 31–33.

7. Contour Analysis and Image Superimposition Task in Computer Vision System / A. I. Novikov, V. A. Sablina, M. B. Nikiforov, A. A. Loginov // The 11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013). Samara, Russian Federation, 2013. Vol. 1. P. 282–285.

8. The Contour Analysis and Image-Superimposition Problem in Computer Vision Systems / *A. I. Novikov, V. A. Sablina, M. B. Nikiforov, A. A. Loginov* // International Journal Pattern Recognition and Image Analysis. Pleiades Publishing. 2015. Vol. 25. Nr. 1. P. 73–80.

9. *Новиков А. И., Ефимов А. И.* Предварительное совмещение изображений и методы оценки качества совмещения // Рос. науч.-техн. журн. «Цифровая обработка сигналов». 2014. № 3. С. 23–29.

10. *Непомнящий П. В., Юрин Д. В.* Поиск опорных точек на векторных изображениях путем детектирования уголковых структур с помощью статистической оценки гипотез // Graphicon, 2002: proceedings. [Электронный ресурс]. URL: http://www.graphicon.ru/2002/ (дата обращения 26.01.2017).

УДК 004.93+681.518.3:004.932

А. С. Пахунов
ведущий специалист отдела закупок, аспирант АО «РПКБ»

ОБЗОР МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предметом исследования являются методы обработки сенсорной и синтезированной видеоинформации в соответствии с авиационной системой комбинированного зрения. Использование таких систем позволяет контролировать пилотируемые и беспилотные летательные аппараты в условиях низкой видимости путем комбинирования видеоинформации с бортовой камерой с видеоданными, синтезированными с помощью априори данной виртуальной модели местности. Известно, что бортовая навигационная система, измеряющая положение и ориентацию летательного аппарата, имеет погрешности точности, из-за которых угол синтезируемого изображения на виртуальной модели области не соответствует ракурсу съемки бортовых камер. Вот почему необходима процедура предварительной обработки сенсорной и синтезированной видеоинформации в авиационной системе комбинированного зрения.

Ключевые слова: *алгоритмы, системы видения, виртуальная реальность, сочетание изображений, виртуальная модель местности, человеко-машинные интерфейсы, авиационные системы, бортовая авионика, комбинированные системы видения, синтезированная система видения.*

A. S. Pahunov
Leading Specialist of the Purchasing Department,
PhD Student of JSC "RPKB"

OVERVIEW OF METHODS OF PRELIMINARY IMAGE PROCESSING

The subjects of the research are methods of processing sensory and synthesized video information in appliance to the aviation system of combined vision. The use of such systems allows controlling manned and unmanned aerial vehicles under conditions of low visibility by combining video information from onboard camera with video data synthesized by a priori given virtual model of a terrain. It is known that onboard navigation system measuring the position and orientation of the aircraft has accuracy errors because of which the angle of the synthesized image on a virtual model of the area does not match the foreshortening of shooting onboard cameras. This is why a procedure of preliminary processing sensory and synthesized video information in the aviation system of combined vision is needed.

Keywords: *algorithms, vision systems, a virtual reality, combining images, virtual model of the terrain, man-machine interfaces, aviation systems, airborne avionics, combined vision systems, synthesized vision system.*

Исходные изображения, используемые в СТЗ для совмещения, как правило, требуют предварительной обработки, поскольку не могут в своей изначальной форме служить основой для качественного совмещения. В рамках предварительной обработки изображения улучшают и приводят к единообразному виду. Методы обработки изображений в СТЗ можно разделить на две следующие группы:

– методы предварительной обработки изображений для визуализации (улучшение видения) или для последующего совмещения;

– методы совмещения изображений и визуализации результатов обработки.

Предварительная обработка заключается в выполнении некоторого количества процедур, которые либо улучшают качество исходного изображения (контрастирование, подавление шума), либо приводят к появлению нового изображения в виде границ перепада яркостей и выделенных контуров объектов постоянного присутствия на изображении (дороги, водоемы, линии электропередач и т. д.).

Предварительная обработка изображения включает в себя выполнение следующих процедур:

– перевод цветных изображений в градации серого;

– контрастирование яркостного диапазона;

– устранение шумовой составляющей;

– выделение границ объектов на изображениях;

– фрагментное представление изображения с последующей их пороговой фильтрацией;

– утоньшение границ;

– аппроксимация границ прямолинейными элементами (отрезками);

– переход к векторному описанию результатов аппроксимации.

Важную роль при выравнивании освещенности играет перевод изображения в цветовое пространство. Часто используемыми пространствами являются RGB, GreyScale, YUV, LAB, HSB HLS, CMYK и др. пространства, каждое из которых применяется для решения отдельной задачи обработки изображений.

Совмещение изображения от телекамеры и синтезированного изображения ввиду их различной природы наиболее естественно и эффективно производить на основе сравнения контуров объектов, имеющихся на этих изображениях. Существует множество методов подчеркивания и выделения контуров объектов, но почти все они в той или иной мере анализируют яркости соседних пикселей, принимая решение о нахождении точки, принадлежащей контурной линии.

Алгоритмы выделения границ и их привязки к существенным элементам изображения называют детекторами краев (edge detector). Локальным результатом работы детектора краев (границ перепада яркости изображения) являются граничные точки – точки изображения, в которых яркость изменяется особенно сильно. Объединение множества таких точек образует линии, замкнутые или нет. Замкнутые линии могут быть границей некоторой области на поверхности Земли, например водоема, взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэродромов и т. д. Незамкнутым линиям на обработанном детектором границ изображении могут отвечать линия горизонта, дороги, складки рельефа земной поверхности.

По принципу нахождения граничных линий на изображениях существующие детекторы границ можно разделить на следующие три группы.

Фильтрация в частотной области спектрального разложения изображения.

Сегментация изображения с последующей пороговой обработкой.

Получение границ по результатам вычисления градиента изображения.

Первый подход к выделению границ основывается на том, что резкое изменение яркости пикселей изображения формируется высокочастотным сигналом. Результаты обработки зависят от базиса разложения. Чем точнее базис описывает характер изображения, тем точнее будет результат выделения границ. Хорошо себя зарекомендовали разложение Фурье (дискретное преобразование Фурье (ДПФ)) [1], Уолша [2] и нахождение линий разложением Хафа.

В условиях реальных телевизионных снимков получение качественных контурных линий данными методами трудно реализуемо. Это связано с нечеткими границами объектов или отсутствием длинных линий. На ухудшение возможного результата оказывают влияние шумы и перепады яркостей на отдельных участках изображения. Удаление высоких частот из результата дискретного преобразования Фурье при обработке изображений может приводить к тому, что вместе с шумом будет теряться четкость границ существующих объектов.

В группе методов, основанных на сегментации, можно выделить несколько подгрупп [3, 4]:

– основанные на кластеризации;

– основанные на локальных порогах;

– основанные на энтропии;

– основанные на оттенках серого и гистограммах;

– основанные на пиксельной корреляции;

– основанные на атрибутах.

Интерес (с точки зрения быстродействия обработки реального изображения) среди этих методов представляют методы, основанные на кластеризации, и методы, основанные на оттенках серого и гистограммах. Однако недостатком детекторов границ, основанных на оттенках серого и гистограммах, является получение ложных контуров или отсутствие контура для границ, представленных незначительным перепадом яркости.

Наиболее популярным является метод кластеризации *k-means*. Алгоритм стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров.

Несмотря на то что алгоритм обеспечивает наилучшую аппроксимацию данных, он имеет следующие проблемы, не позволяющие использовать его в автоматических системах технического зрения.

Метод не гарантирует достижения глобального минимума суммарного квадратичного отклонения V, а только одного из локальных минимумов.

Результат зависит от выбора исходных центров кластеров, их оптимальный выбор неизвестен. Число кластеров надо знать заранее.

Градиентные детекторы границ (в отличие от сегментации) выполняют усиление резких перепадов яркости на изображении. Все операторы являются различными модификациями дифференцирования двумерного поля по различным направлениям области определения. Градиентные операторы, как и предыдущие детекторы краев, при дифференцировании сигналов с помехами усиливают их. Для снижения влияния помех используются варианты дифференцирования с накоплением и другие приемы подавления шума [5].

Градиентные операторы имеют простую реализацию и представляют собой масочный линейный фильтр. Маска является скользящим окном, при помощи которого отбираются отсчеты обрабатываемого изображения и выполняется их поэлементное умножение с элементами маски.

Одними из наиболее простых и известных методов выделения границ перепада яркости на изображении являются методы Собеля и Превитта [6].

Более сложным в реализации, но дающим хорошие результаты детектирования границ является метод Кэнни. Он включает в себя метод Собеля как один из этапов обработки изображения.

Метод Кэнни дает на выходе тонкие линии толщиной один пиксель, тогда как методы Собеля и Превитта позволяют получать так называемый «контурный препарат» – линии толщиной в несколько пикселей с различной интенсивностью яркости в них [7].

Градиентные методы. В большинстве методов как первого (методы, основанные на получении оценок частных производных первого порядка), так и второго (методы, основанные на получении оценок частных производных второго порядка) порядков используется свойство симметричных операторов.

Одна из важнейших проблем известных градиентных методов Собеля, Превитта и др. заключается в том, что они дают «толстые» линии границы. Не обладают они и достаточным сглаживающим эффектом. Поэтому их применение в условиях интенсивного шума не дает хорошего результата. От этих недостатков свободен метод Кэнни (Canny, [8]). Однако метод Кэнни в условиях шумов может приводить к появлению большого числа малоинформативных линий (эффект «спагетти» по выражению Гонсалеса и Вудса) [6].

Высокая чувствительность метода Кэнни приводит к тому, что при обработке этим методом реальных зашумленных изображений негативно проявляет себя отмеченный выше эффект появления ложных замкнутых линий.

Методы Собеля и Превитта (в отличие от методов Кэнни и углового коэффициента) имеют меньший объем вычислительных операций. Однако результатом работы методов Собеля и Превитта являются «толстые» линии перепада яркости. Методы Кэнни и углового коэффициента сразу формируют тонкие линии контуров. Данное качество этих методов является важным условием успешного решения задачи совмещения разнородных изображений одного и того же участка подстилающей поверхности, представленных контурами основных объектов на этой поверхности. Вместе с тем результаты работы детекторов границ Собеля и Превитта целесообразно использовать для визуализации.

Обработка изображений на борту воздушного судна должна выполняться в реальном времени и в автоматическом режиме. Поэтому алгоритмы, обеспечивающие решение соответствующих задач в системах технического зрения на борту воздушного судна, должны обладать высоким быстродействием и защищенностью от помех. С этих позиций метод Кэнни менее надежен, чем, например, методы Собеля и Превитта, а также метод углового коэффициента.

Библиографический список

1. *Костров Б. В., Асаев А. С., Муратов Е. Р.* Фильтрация периодических помех на изображении // 14-я междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2005. С. 205–206.

2. *Костров Б. В., Муратов Е. Р.* Особенности распознавания изображений в базисе Уолша // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2007. С. 81–82.

3. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 351 с.

4. *Грищенко А. А.* Обработка изображений, цифровая обработка сигналов, распознавание образов // Сектор археологической теории и информатики ИАЭТ СО РАН. 2003. 121 с.

5. *Новиков А. И.* Алгоритмы выделения границ полезных сигналов // Вестн. РГРТУ. Рязань, 2008. Вып. 24. № 2. С. 11–15.

6. *Гонзалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

7. *Forsyth D. A., Ponce J.* Computers Vision: A Modern Approach. N. Y.: Prentice-Hall, 2011. 792 p.

8. *Canny J. A.* Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence. November, 1986. Vol. PAMI-8. Nr. 6. P. 679–698.

УДК 62-83:621.77, 62-83:681.5

Е. В. Полилов
кандидат технических наук, доцент
Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск

О МЕСТОПОЛОЖЕНИИ ГИПЕРПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ РЕЛЕЙНО-МОДАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Впервые предложен чрезвычайно простой и наглядный модальный метод синтеза гиперповерхностей скольжения f(x) релейных систем. Получены новые методы определения коэффициентов K подсигнатурной функции релейных регуляторов. Определена динамика поверхности скольжения как средства расширения доступного фазового пространства.

Ключевые слова: *релейные системы, гиперповерхность скольжения, модальное управление, фазовая траектория, скользящий режим.*

E. V. Polilov
PhD, Tech., Associate Professor
Donbass State Technical University, Alchevsk

ON THE LOCATION OF THE SLIDING HYPERPSURFACE OF RELAY-TYPE MODAL SYSTEMS

For the first time, an extremely simple and intuitive modal method for synthesizing the hypersurfaces of sliding f(x) of relay-type systems is proposed. New methods for determining the coefficients K of relay regulators are obtained. The dynamics of the sliding surface is defined as a means of expanding the available phase space.

Keywords: *relay-type systems, sliding hypersurface, modal control, phase trajectory, sliding mode.*

Актуальность работы. В теории управления известны системы с особым видом движения – скользящими режимами, обладающие высокой робастностью к аддитивным помехам, а также обеспечивающие редукцию системы в скользящем режиме и динамику не хуже заданной в условиях параметрической неопределенности. В характерных для многих технических приложений условиях неполноты исходной информации о свойствах объекта управления и ограниченном доступе к измерительной информации о его состоянии становится актуальной проблема построения систем регулирования, обладающих статическими и динамическими характеристиками, близкими к оптимальным по заданным критериям эффективности. Очевиден мотив и поиск законов управления в озвученном классе систем.

Материал и результаты исследований. Известные законы управления [1–4 и мн. др.], несмотря на различные подходы, предложенные авторами для решения фундаментальных задач оптимизации по тем или иным критериям качества, задач стабилизации и слежения, а также решения конкретных прикладных задач и управления сложными техническими объектами, в конечном итоге представляют собой взвешенную комбинацию фазовых координат x_j, $\forall j = \overline{1,n}$ объекта, входящих в т. н. подсигнатурную функцию s, с постоянным $u_{\max} = \text{const}$ либо принудительно изменяемым во времени уровнем $u_{\max}(t) = f(\mathbf{x}, t)$ сигнала управления:

$$u = u_{\max}\,\mathrm{sgn}(s), \qquad (1)$$

где $s = f(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{bmatrix}$; n – порядок объекта управления.

В качестве координат x_j в базовых алгоритмах могут выступать и фиктивные величины вектора $\tilde{\mathbf{x}} \leftarrow \mathbf{T}^{-1}\mathbf{x}$, полученные путем преобразования координатного базиса $e_1, \dots, e_n$ исходной системы $\mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} \to \tilde{\mathbf{A}}$ в базис $e_1^*, \dots, e_m^*$ того или иного фазового пространства, посредством матрицы неособого преобразования $\mathbf{T}$. Свойства грубости/робастности конечных алгоритмов, а также сложность их технической реализации зависят от выбранного базиса.

Знаковая функция $\mathrm{sgn}(f(\mathbf{x}))$, ее роль в релейных системах. Для корректного восприятия последующего материала полагаем возможным раскрыть суть, возлагаемую на функцию выделения знака $\mathrm{sgn}(f(\mathbf{x}))$ в релейных системах. В ма-

тематике: sgn (сигнум, от лат. signum – знак) – кусочно-постоянная функция. Обозначается sgn(x) или sign(x). Определяется следующим образом:

$$\operatorname{sgn}(x)=\begin{cases}1, & \text{если} \quad x>0,\\ 0, & \text{если} \quad x=0,\\ -1, & \text{если} \quad x<0.\end{cases} \qquad (2)$$

Далее аналитически заданы свойства функции, как то: область определения, область значений, гладкость, нечетность, точка разрыва и т. п. Нарисован график функции $y = \operatorname{sgn}(x)$, аналогичный представленному на рис. 1. Г-образный вид этой функции в первом и третьем квадрантах, а также интуитивно понятные ассоциации с процессами вкл. и выкл. *реле* как электромеханического устройства и обусловили название теории *релейного* управления. На этом, по всей видимости, и должен оканчиваться этот ассоциативный ряд, поскольку, во-первых, реализация тех самых вкл. и выкл. возложена на силовые преобразовательные устройства, сквозь которые дозированно прокачивается сетевая мощность в нагрузку или обратно из нее в зависимости от выбранного рабочего технологического режима комплекса.

Меняя временную скважность состояний вкл. и выкл. силовых модулей, можно добиться того самого «дозирования» мощности, это интуитивно понятные и общеизвестные факты. А что, если мысленно представить подобное управление, но с принудительно изменяемой во времени амплитудой $u_{\max}(t)\neq\text{const}$? Это не вписывается в концепт банального вкл. и выкл. *реле*. Во-вторых, выделение знака специализированной математической функцией sgn(f(**x**)) как такового – это итог/результат, *нисколько не отражающий сути* процессов, заложенных в стратегии релейного управления. Приведем элементарный пример, каково значение функции sgn(5) и sgn(–5)?

Ответ очевиден, если вспомнить Г-образный график – в первом случае результат +1, во втором –1.

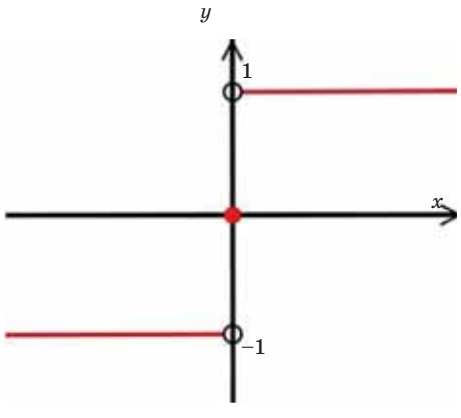


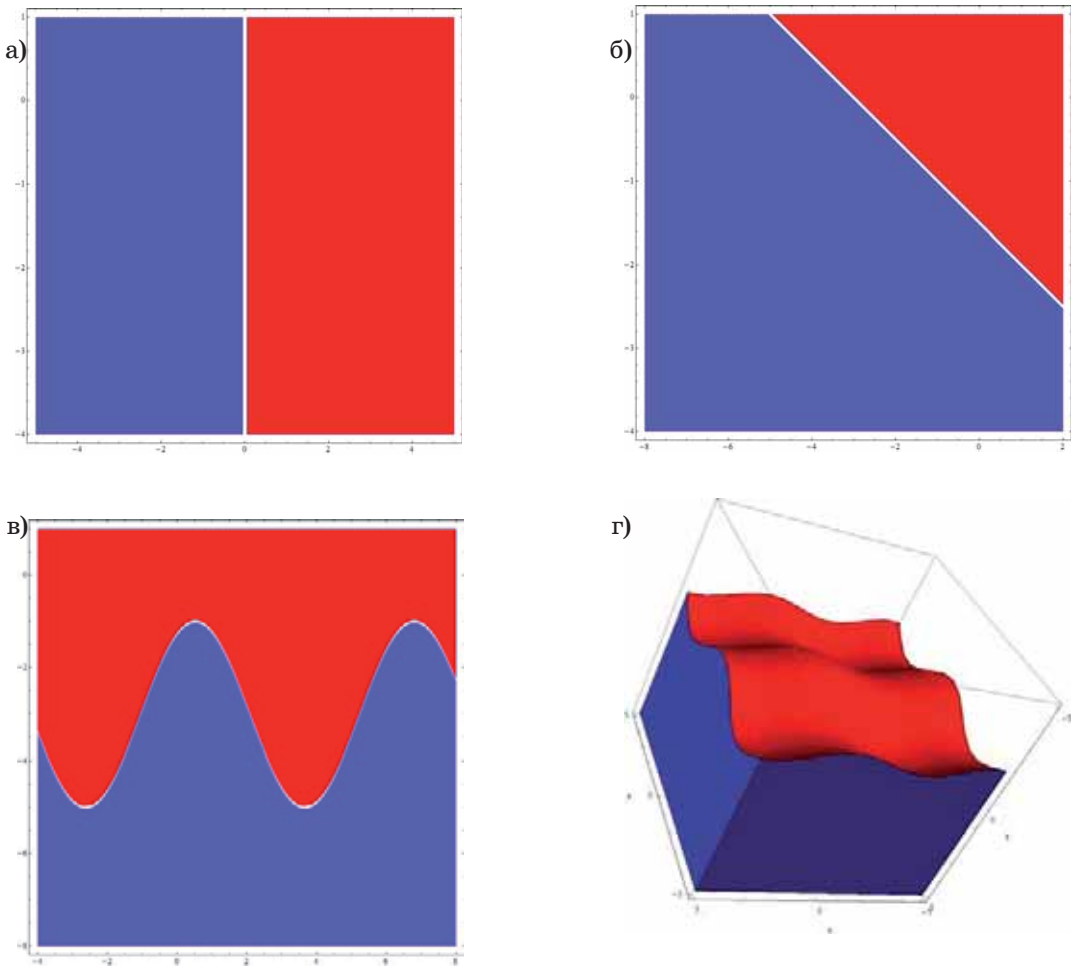
Рис. 1. График функции y = sgn(x), интерпретируемый как «релейный элемент»

С числами под знаковой функцией все предельно просто. Усложним задачу, вводя под сигнум sgn(f(**x**)) простейшие плоские функции двух переменных, например смещенные «линию» f(**x**) = 1x+2y+3 или «синус» f(**x**) = y–2sin(x+π/3)+3. С этой задачей без подготовки безошибочно справляются не все лучшие аспиранты технических университетов. Попросив решить задачу графически и *расставить знаки* в координатных осях, первая реакция: «...а какие проблемы? Все, что левее оси ординат, со знаком –1, соответственно, все, что правее вертикальной оси, со знаком +1». Некоторые добавляют, что в координатном нуле – 0. Абсурд, поскольку подобный смысловой трюк срабатывал исключительно на числах, а здесь функция f(**x**). Ассоциации с *реле* и Г-образным графиком знаковой функции, рис. 1, неуместны и бессильны.

А если это нелинейная поверхность? Или в общем случае n-мерная функция? Ответ очевиден, если увидеть верное решение (рис. 2).

Иными словами, знаковая функция sgn(f(**x**)) в задачах управления много больше, нежели возложенное на нее банальное выделение знака. Как факт, эта функция решает куда более важную проблему т. н. *классификации*, являясь при этом по сути своей *функцией принадлежности*. Наиболее яркий для понимания пример с любой замкнутой трехмерной поверхностью – сфера, лежащая в трехмерном пространстве. Поверхность сферы отсекает в пространстве три области: кусок пространства, находящийся внутри сферы, непосредственно поверхность самой сферы и все остальное, находящееся вне ее. Так вот, если аналитически определена функция этой поверхности f(**x**) = 0, то sgn(f(**x**)) будет давать –1 в любой точке внутри сферы, 0 – на поверхности сферы и +1 вне ее поверхности. Можно задать резонный вопрос: а при чем же здесь управление, в котором, по уверению разработчиков, роль знаковой функции настолько бесценна?

Теперь, плавно переходя от потенциально уже решенной задачи классификации/принадлежности и учитывая, что сама по себе подсигнатурная функция f(**x**) = 0 на самом деле однозначно определяет/задает в n-мерном фазовом пространстве т. н. *гиперповерхность скольжения* (рис. 3), находясь на которой система обладает теми или иными прогнозируемыми свойствами, в частности, желаемой динамикой, и вся та нетривиальная аналитика методов расчета «коэффициентов обратных связей» [1–4 и др.] по сути своей и определяет *исключительно геометрическое местоположение* той самой гиперповерхности в пространстве, на функцию управления **u** как таковую возлагается теперь куда более важная задача *попадания/вдавливания изображающей точки* на выбранную поверхность скольжения и удержания на ней. Причем это осуществляется за счет всего имеющегося потенциала у



$$\operatorname{sgn}\left(f(\mathbf{x})\right)=\begin{cases}1, & \text{если} \quad f(\mathbf{x})>0\\ 0, & \text{если} \quad f(\mathbf{x})=0\\ -1, & \text{если} \quad f(\mathbf{x})<0\end{cases}$$

Рис. 2. Графическая интерпретация «знаковой функции»: а) $f(\mathbf{x}) = x$ – действительные числа; б), в) $f(\mathbf{x}) = 1x+2y+3$, $f(\mathbf{x}) = y-2\sin(x+\pi/3)+3$ – плоские кривые; г) $f(\mathbf{x}) = \sin(x)+2\sin(y)+3z+4$ – нелинейная поверхность

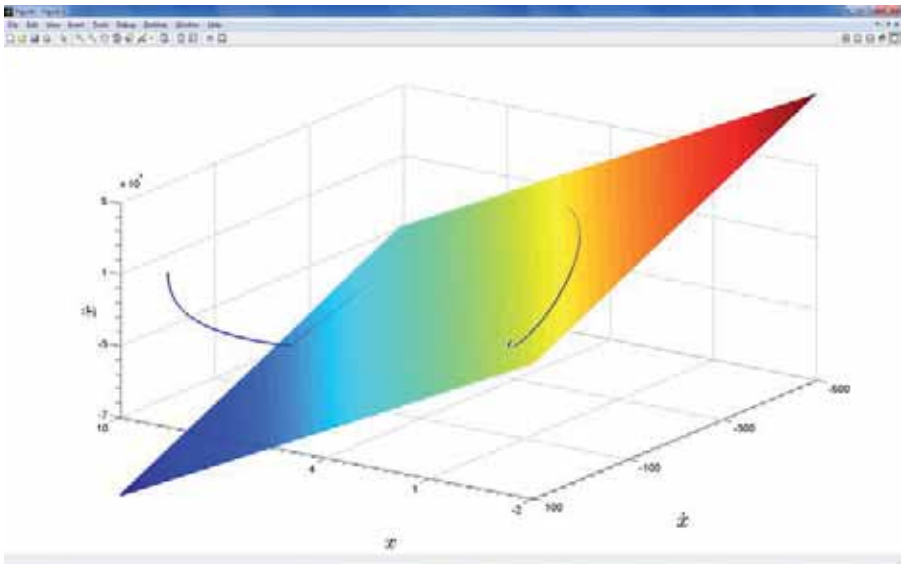


Рис. 3. Гиперповерхность скольжения линейной динамической системы 3-го порядка

системы – двух противоположно направленных векторных полей/«сил», определяемых $\pm u_{\max}$, и здесь уже уместно вспомнить о знаке (если сильно, до дрожи в руках сдавить встречно-направленные ладони, можно на себе ощутить, что заставляет систему скользить исключительно в пределах выбранной поверхности, на которой по определению $\mathrm{sgn}(f(\mathbf{x})) = 0$).

Аналогии с водными лыжами здесь более чем уместны и очевидны, поскольку взаимопротивоположные векторные поля сил гравитации $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{T}}$ и Архимедовы $\vec{\mathbf{F}}_{A}$ не оставляют ни малейшего шанса на разочарование, позволяя любому желающему насладиться скольжением по водной глади хотя бы мысленно.

Не составляет труда придумать гиперповерхность скольжения $f(\mathbf{x}) = 0$ *нелинейной*, разместив для уверенности, например, точку любого локального минимума $\min\limits_{j=1\ldots n} f(\mathbf{x})$ в координатный ноль (рис. 4). Потенциально неограниченное множество методов синтеза поверхностей тогда, счета коэффициентов слагаемых в аналитической форме записи $f(\mathbf{x}) = 0$, выстраивание исторически «поколений скользящих режимов», поиск удачных $f(\mathbf{x}) = 0$ и мн. др. *В этом нет никакого практического смысла*. Движение в окрестности 0.

Посему гиперповерхности скольжения $f(\mathbf{x}) = 0$ полагаем *линейными*.

Для усиления слов сказанного взамен сигнума можно предложить некую *информационную функцию* $F(f(\mathbf{x}))$, суть которой сведена к классификации в пределах различных «слоев пирога». Получив на выходе функции, например, значение +5, мы четко знаем, что система находится именно в этом конкретном «слое» пространства, с которым и ассоциировано число +5. При определении подобной функции в табличной форме в виде n-мерной матрицы появляется уникальная возможность классификации и нахождения местоположения системы по элементарным кластерам. Более того, появляется возможность «оживить» классическую стационарную поверхность,

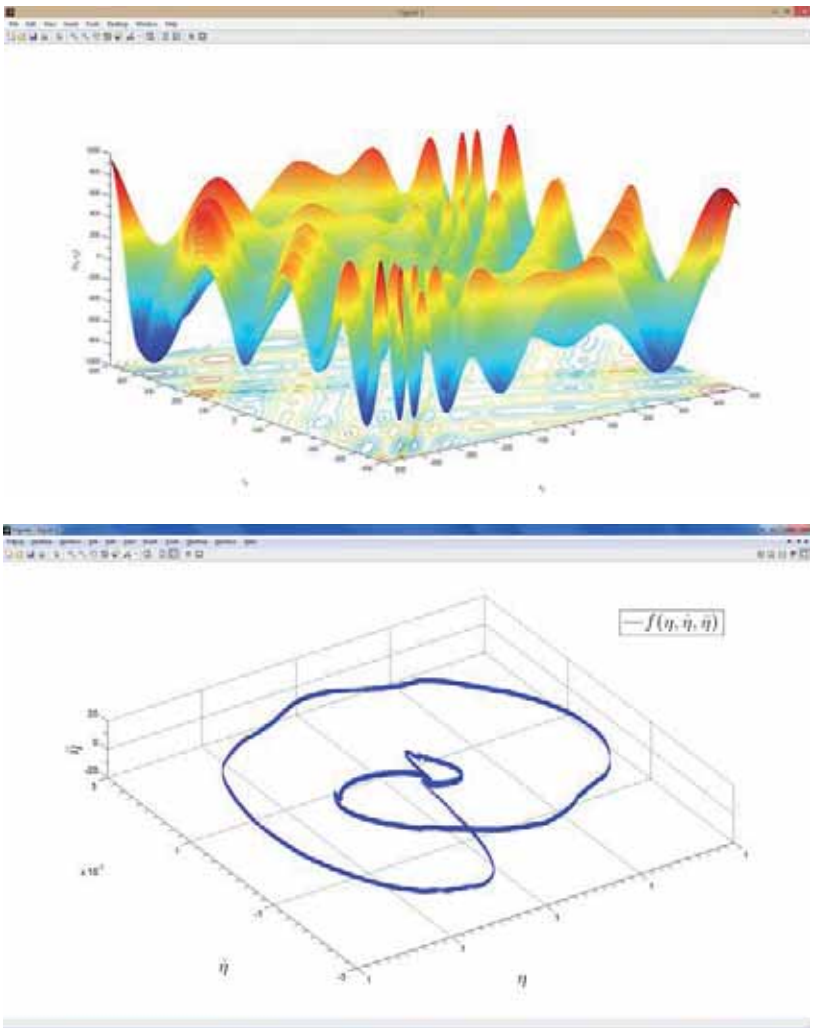


Рис. 4. Гиперповерхность и фазовая траектория η*-базиса рассогласований на клочке гиперповерхности, стремящейся в ноль (точность слежения по оси* η $\pm 3{\cdot}10^{-5}$, *по оси* $\dot{\eta}$ $\pm 3{\cdot}10^{-3}$)

превратив совокупность слоев/кластеров в гиперобъем, «переключаясь» между близлежащими.

$$F\left(f(\mathbf{x})\right)=\begin{cases} n, & \text{если} \quad f(\mathbf{x})>n \\ & \vdots \\ 1, & \text{если} \quad 1/n>f(\mathbf{x})>0 \\ 0, & \text{если} \quad f(\mathbf{x})=0 \\ -1, & \text{если} \quad -1/n<f(\mathbf{x})<0 \\ & \vdots \\ -n, & \text{если} \quad f(\mathbf{x})<-n. \end{cases} \qquad (3)$$

Решим задачу нахождения коэффициентов **K** обратных связей в релейно-модальных САР (РМСАР) с линейной гиперповерхностью скольжения $f(\mathbf{x}) = \mathbf{Kx}$ геометрически. Для динамического объекта 3-го порядка ожидаем плоскость $Ax+By+Cz+D = 0$ в подсигнатурной функции s. В соответствии с требованиями к динамике системы (например, фильтр Баттерворта 2-го порядка с полосой 10,0 рад/с) модельно в среде Simulink образуем массивы $x(t)$, $px(t)$ и $p^2x(t)$ как реакцию фильтра Баттерворта и производных выхода на скачок задающего воздействия. Исключая время, по полученным данным в трехмерном фазовом пространстве строим фазовую траекторию, визуально она оказывается плоской (рис. 5). Берем *любые три точки массива*, например 100-ю, 1000-ю и 10000-ю по счету, и через них строим плоскость (на диаграмме – коричневая), общее уравнение которой $Ax+By+Cz+D = 0$ по трем точкам (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) и (x_3, y_3, z_3) можно получить из следующих определителей:

$$A=\begin{vmatrix}1 & y_1 & z_1\\ 1 & y_2 & z_2\\ 1 & y_3 & z_3\end{vmatrix};\quad B=\begin{vmatrix}x_1 & 1 & z_1\\ x_2 & 1 & z_2\\ x_3 & 1 & z_3\end{vmatrix};$$

$$C=\begin{vmatrix}x_1 & y_1 & 1\\ x_2 & y_2 & 1\\ x_3 & y_3 & 1\end{vmatrix};\qquad D=-\begin{vmatrix}x_1 & y_1 & z_1\\ x_2 & y_2 & z_2\\ x_3 & y_3 & z_3\end{vmatrix}. \qquad (4)$$

Строим еще одну плоскость, соответствующую уравнению желаемого полинома в РМСАР: $\omega_0^2 x+1{,}41421\omega_0 y+z=0$. Очевидно, они *абсолютно совпадают* даже численно, что, собственно, и не удивительно, если полученное общее уравнение плоскости нормировать относительно C:

$$\begin{cases} k_i: \\ A/C\cong\omega_0^2; \\ B/C\cong 1{,}41421\omega_0; \\ D/C\simeq 0. \end{cases} \qquad (5)$$

Эта вычислительная схема *действительна* и в n-мерном фазовом пространстве выбранных координат $(x_1, x_2, ..., x_n)$, в том числе и фиктивных $\tilde{\mathbf{x}}\leftarrow\mathbf{T}^{-1}\mathbf{x}$, где для геометрического определения местоположения гиперплоскости $f(\mathbf{x})=A_n x_1+B_n x_2+\ldots+N_n x_n+O_n=0$ достаточно выбирать из массива желаемых траекторий $x_1^*(t),\ldots x_n^*(t)$ уже n точек $\underbrace{(a_1,a_2,\ldots a_n)}_{1\text{–я}}$, $\underbrace{(b_1,b_2,\ldots b_n)}_{2\text{–я}}$, ..., $\underbrace{(n_1,n_2,\ldots n_n)}_{n\text{–я}}$, причем сам массив может быть сформирован и непосредственно из рабочей области системы MATLAB соответствующими командами или же получен алгоритмически, моделируя эталонную систему. Стандартные распределения корней по Баттерворту, Бесселю, Грехему – Летропу, полиномы с биномиальными коэффициентами и мн. др. Фундаментальные ограничения [5–10]. Имея многолетний опыт проектирования подобных систем, можем с уверенностью говорить о *чрезвычайной простоте и наглядности* предложенного нового метода синтеза гиперповерхностей скольжения:

$$A_n=\begin{vmatrix}1 & a_2 & \ldots & a_n\\ 1 & b_2 & \ldots & b_n\\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots\\ 1 & n_2 & \ldots & n_n\end{vmatrix};\quad B_n=\begin{vmatrix}a_1 & 1 & \ldots & a_n\\ b_1 & 1 & \ldots & b_n\\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots\\ n_1 & 1 & \ldots & n_n\end{vmatrix};$$

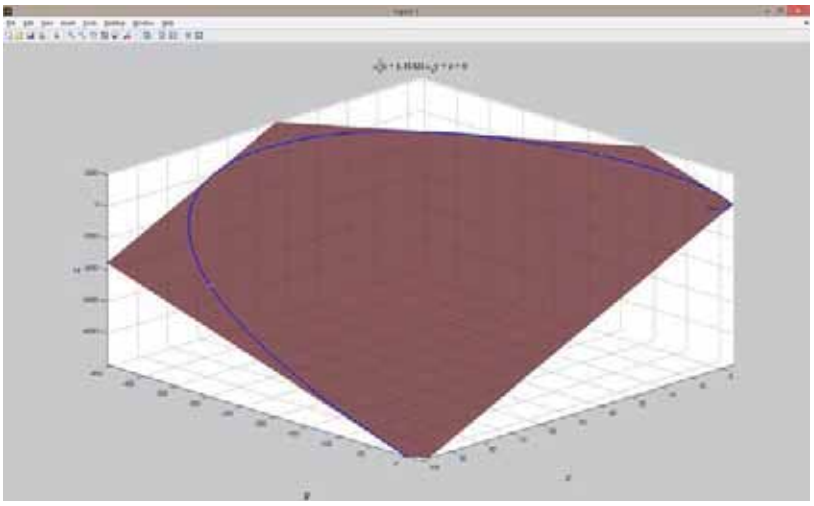


Рис. 5. Графическое решение задачи синтеза РМСАР

и т. д. до

$$N_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & \dots & 1 \\ b_1 & b_2 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_1 & n_2 & \dots & 1 \end{vmatrix}; \; O_n = -\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ b_1 & b_2 & \dots & b_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_1 & n_2 & \dots & n_n \end{vmatrix}. \quad (6)$$

$$f(\mathbf{x}) = \underbrace{\frac{A_n}{A_n}}_{k_1=1} x_1 + \underbrace{\frac{B_n}{A_n}}_{k_2} x_2 + \dots + \underbrace{\frac{N_n}{A_n}}_{k_n} x_n + \underbrace{\frac{O_n}{A_n}}_{\approx 0} = 0. \quad (7)$$

Здесь x_1 – *регулируемая* координата контура.

Интуитивно понятная вычислительная процедура сводится к счету $n + 1$ шт. определителей матриц, образованных сдвигом единичного столбца.

Суть проделанного в явной форме отражает интуитивно ясную взаимосвязь ключевых понятий: гиперповерхность скольжения $f(\mathbf{x}) = 0$, подсигнатурную функцию $f(\mathbf{x})$, желаемую и фактическую фазовые траектории $x_1^*(t),\dots x_n^*(t)$ и $x_1(t),\dots x_n(t)$, коэффициенты **K** подсигнатурной функции $f(\mathbf{x})$. Очевидно, для систем n-го порядка с законом управления $u^* = -\mathrm{sgn}(\mathbf{Kx})$ геометрическим местом точек скольжения является гиперплоскость (n-1)-го порядка. Важным этапом в понимании дальнейших выкладок и преобразований законов управлений является и простейший пример с параллельностью плоскостей. На рис. 6 в трехмерном пространстве представлены две плоскости, образованные параллельным смещением на величину Δ. Если мысленно представить плавную динамику самой поверхности $f(\mathbf{x}) = 0$ $(n - 1)$-го порядка и прогнозируемое движение фазовой точки на ней, становится возможным «покрывать/заполнять» все n-мерное фазовое пространство (рис. 7).

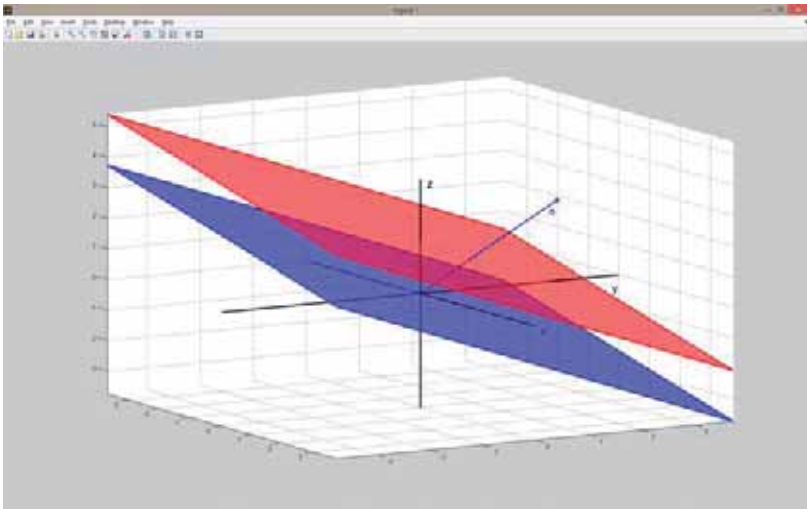


Рис. 6. Параллельность плоскостей и управляемая динамика $f(\mathbf{x}, t) = 0$ как инструмент расширения доступного фазового пространства

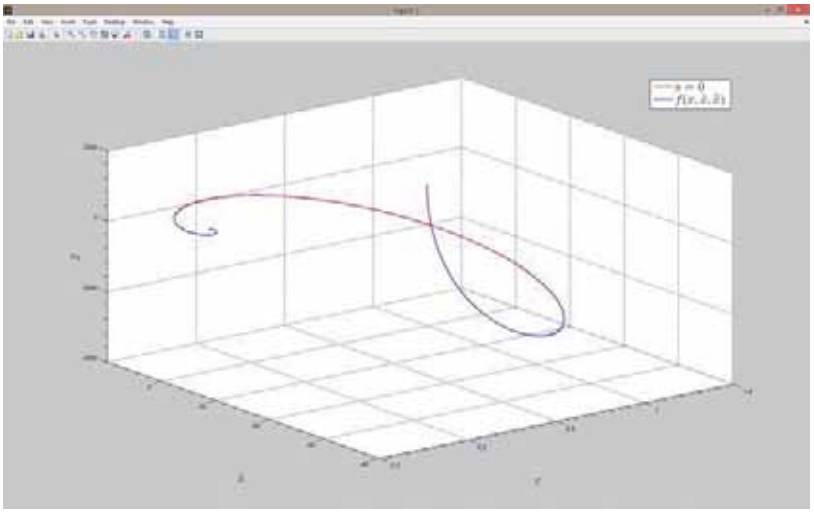


Рис. 7. Фазовая траектория изображающей точки в «кубе скольжения» (движению доступно все n-мерное фазовое пространство)

Динамика поверхности скольжения как средство расширения доступного фазового пространства. Развивая представленную идею расширения доступного фазового пространства до n-мерного, определим закон динамики гиперповерхности скольжения как функцию координат состояния объекта.

Для известной динамики системы, представленной в исходном фазовом пространстве уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x})\mathbf{u}, \qquad (8)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ вектор состояния и $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ вектор управлений, полагаем, что существует некое управление $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0(\mathbf{x})$, *возможно, гладкое*, которое стабилизирует систему (8), обеспечивая ей заданные точностные показатели, в том числе в динамике или в режиме слежения за заданной траекторией.

Определим эту идеальную систему как

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = f(\mathbf{x}_0) + B(\mathbf{x}_0)\mathbf{u}_0, \qquad (9)$$

где $\mathbf{x}_0$ описывает фазовую траекторию «номинальной» системы под действием управления $\mathbf{u}_0$. Разумеется, реальные технические системы функционируют в условиях неопределенности, вызванной изменением параметров объекта, неучтенной динамикой и внешних возмущений. Учитывая этот факт, траектория реальной системы должна быть дополнена

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{h}(\mathbf{x},t), \qquad (10)$$

где вектор $\mathbf{h}(\mathbf{x},t)$, собственно, и учитывает указанную неопределенность. Предполагаем также и выполнение условия согласования

$$\mathbf{h}(\mathbf{x},t) \in B(\mathbf{x})\mathbf{u}_h, \quad \mathbf{u}_h \in \mathbb{R}^m. \qquad (11)$$

Иными словами, полагаем, что «сквозь» матрицу $B(\mathbf{x})$ имеется возможность «влиять» на все компоненты вектора $\mathbf{h}(\mathbf{x},t)$.

Предположим также, что вектор $\mathbf{h}(\mathbf{x},t)$ ограничен

$$\left\| h_i(\mathbf{x},t) \right\| \le h_i^+(\mathbf{x},t), \quad i = 1\ldots n, \qquad (12)$$

и для его верхней грани могут быть определены известные скалярные функции $h_i^+(\mathbf{x},t)$.

Учитывая вышесказанное, *стратегия* состоит в нахождении такого управления $\mathbf{u}(\mathbf{x},t)$, при котором траектории системы (10) удовлетворяют условию $\mathbf{x}(t) \equiv \mathbf{x}_0(t)$ с начального момента времени $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0(0)$.

Для системы (10) назначим управление

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_1, \qquad (13)$$

где $\mathbf{u}_0 \in \mathbb{R}^m$ «идеальное управление», упоминаемое в (9), и $\mathbf{u}_1 \in \mathbb{R}^m$ разрывное управление, задача которого компенсировать $\mathbf{h}(\mathbf{x},t)$. Имеем

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x})\mathbf{u}_0 + B(\mathbf{x})\mathbf{u}_1 + \mathbf{h}(\mathbf{x},t). \qquad (14)$$

Зададим многообразие скольжения

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_0(\mathbf{x}) + \mathbf{z}, \text{ здесь } \mathbf{s},\ \mathbf{s}_0(\mathbf{x}) \text{ и } \mathbf{z} \in \mathbb{R}^m, \qquad (15)$$

первая составляющая $\mathbf{s}_0(\mathbf{x})$ которого для простоты может быть определена как *линейная комбинация* координат состояния системы, например в виде гиперплоскости известными методами [1–4], или же *задана случайно* с весовыми коэффициентами $k_i > 0$, что непринципиально, в общем случае $\mathbf{s}_0(\mathbf{x})$ – даже любая «гладкая» нелинейная гиперповерхность; вторая составляющая $\mathbf{z}$ представляет собой выход некой динамической системы, которая будет определена позже.

Согласно выбранной стратегии, для обеспечения $\mathbf{x}(t) \equiv \mathbf{x}_0(t)$ во всем временном диапазоне $t > 0$, эквивалентное управление $\mathbf{u}_1$, обозначаемое $\mathbf{u}_{1\text{экв}}$,

$$B(\mathbf{x})\mathbf{u}_{1\text{экв}} = -\mathbf{h}(\mathbf{x},t) \qquad (16)$$

или в терминах (11):

$$\mathbf{u}_{1\text{экв}} = -\mathbf{u}_h. \qquad (17)$$

Величина $\mathbf{u}_{1\text{экв}}$ однозначно определяет траектории системы при скольжении по выбранной гиперповерхности $\mathbf{s}(\mathbf{x}) = 0$.

Для задания вспомогательной переменной $\mathbf{z}(\mathbf{x},t)$ в (15) приравняем производную $\dot{\mathbf{s}}$ нулю:

$$\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{s}}_0(\mathbf{x}) + \dot{\mathbf{z}} = \frac{\partial \mathbf{s}_0}{\partial \mathbf{x}} \times$$
$$\times \underbrace{\left(f(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x})\mathbf{u}_0 + B(\mathbf{x})\mathbf{u}_{1\text{экв}}(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x})\mathbf{u}_h \right)}_{d\mathbf{x}/dt} + \dot{\mathbf{z}} = 0. \qquad (18)$$

Для выполнения условия (17) зададим

$$\dot{\mathbf{z}} = -\frac{\partial \mathbf{s}_0}{\partial \mathbf{x}}\left(f(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x})\mathbf{u}_0 \right), \quad \mathbf{z}(0) = -\mathbf{s}_0(\mathbf{x}(0)), \qquad (19)$$

где начальное состояние $\mathbf{z}(0)$ выбрано таким для обеспечения $\mathbf{s}(0) = 0$. Иными словами, скользящий режим *возникает с «нуля времени»*. И, поскольку выполнено условие (17), уравнение движения системы в скользящем режиме

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x})\mathbf{u}_0 \qquad (20)$$

не зависит от $\mathbf{h}(\mathbf{x},t)$ и эквивалентно траекториям идеальной системы (9).

Формально, с математической точки зрения, если $\mathbf{s}_0(\mathbf{x})$ в (15) определяет стационарную гиперповерхность, рассекающую n-мерное пространство объекта на две «доли», именно слагаемое z, так или иначе, изменяясь во времени, может быть интерпретировано как инструмент для прогнозируемого и намеренного *параллельного* «смещения»/динамики гиперповерхности $\mathbf{s}_0(\mathbf{x}) = 0$ в n-мерном фазовом пространстве, о чем упоминалось выше (переменную z можно представить и как временну́ю зависимость $z(t)$ с заранее определенным массивом данных или даже сформировать своего рода «задатчик» траектории фиктивной координаты). Тем самым при «усаживании»

фазовой точки на нестационарную поверхность в системе становятся достижимы плавные «подъемы и спуски», включая движение точки и на самой поверхности, потенциально *покрывая скольжением все n-мерное пространство*, разумеется, в рамках допустимого гиперобъема, который в реальных технических системах *должен быть* отсечен, например, традиционной идеологией вложенности контуров с ограничениями внутренних управляющих сигналов.

На рис. 8 представлена графическая интерпретация предлагаемой стратегии управления на примере системы 3-го порядка. Красным здесь показана гиперповерхность $\mathbf{s}_0(\mathbf{x})$, в общем случае она может быть назначена нелинейной, синий цвет отражает прогнозируемый $z(t)$ либо контролируемый $z(\mathbf{x},t)$ уровень ее параллельного смещения в n-мерном пространстве ($\pm\Delta$ по аналогии с рис. 6). Кубом отсечен допустимый гиперобъем. Наиболее уместны в этой задаче ассоциации с реверсивной помпой, регулирующей «уровень воды» в полом кубе.

Представленная идеология отдаленно напоминает суть в алгоритмах, ставших уже классикой [1–4] т. н. релейных η-систем с принудительным формированием траектории движения $\mathbf{x}^*$ извне, и введение рассогласований $\eta_i = x_i - x_i^*$ в алгоритмы управления, если величину $z(t)$ ассоциировать именно как независимую желаемую «программную траекторию». Но, в отличие от этого случая, здесь $z(\mathbf{x},t)$ является *связующим звеном* между алгоритмически вычисляемым состоянием «встроенной эталонной модели» динамики поверхности $z \to s_0^*(\mathbf{x},t)$, определяемой управлением $\mathbf{u}_0$ и «копирующим ее поведение» классифицирующим сигнумом $\operatorname{sgn}\left(s_0(\mathbf{x},t) - s_0^*(\mathbf{x},t)\right)$ в управлении $\mathbf{u}_1$, *постоянно «держа руку на пульсе»* состояния объекта. Знаковая функция $\operatorname{sgn}(y-z)$ тремя уровнями +1, 0 и −1 в состоянии классифицировать принадлежность и взаимное положение $y \leftarrow s_0(\mathbf{x})$ и $z \to s_0^*(\mathbf{x},t)$: $z > y$, $z = y$ и $z < y$ соответственно (суть знаковой функции в этой постановке сводится именно к этому), что в конечном итоге позволяет говорить об увеличении размерности достижимого пространства исходным объектом, а *тандем управлений* $\mathbf{u}_0$ и $\mathbf{u}_1$, являя собой мощнейший инструмент, позволяет сметать на своем пути все в $\mathbf{h}(\mathbf{x},t)$ для достижения $\mathbf{x}(t) \equiv \mathbf{x}_0(t)$. Причем, перекрывая амплитудой $\mathbf{u}_1$ возможные неопределенности согласно (16), управление $\mathbf{u}$ может быть назначено и чисто разрывным $\mathbf{u} \equiv \mathbf{u}_1$, а «идеальное управление» $\mathbf{u}_0$ в этом случае будет использовано исключительно для вычисления переменной $\mathbf{z}$ динамики/смещения гиперповерхности скольжения в (19). И даже форма, не только местоположение гиперповерхности $\mathbf{s}_0(\mathbf{x}) = 0$ в $\mathbf{u}_1$, могут быть *назначены любыми*, несмотря на то что это может оказаться и совсем бессмысленно с технической точки зрения – решения и без того гарантированы динамикой $z(\mathbf{x},t)$, добавляется лишь адреналин при разработке и наслаждение анимацией с «танцующей» под фазовой точкой поверхностью, при этом сама точка в силу навязанной стратегии управления рисует в n-мерном фазовом пространстве заданную кривую. Подобные результаты нами получены и при создании новой вычислительной схемы с т. н. «дублирующим регулятором», когда местоположением гиперповерхности $\mathbf{s}$ подчиненного внутреннего регулятора $\mathbf{u}_1$ управляет внешний $\mathbf{u}_0$, формально формируя дважды управление в контуре.

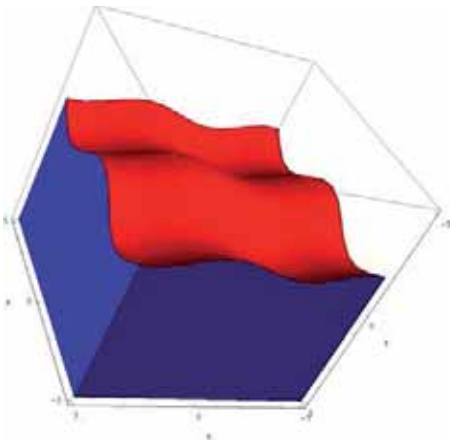


Рис. 8. Графическая интерпретация предлагаемой стратегии управления на примере системы 3-го порядка(движению доступно все n-мерное фазовое пространство)

Заключение

Впервые предложен чрезвычайно простой и наглядный модальный метод синтеза гиперповерхностей скольжения $f(\mathbf{x})$ релейных систем. Определена динамика поверхности скольжения как средства расширения доступного фазового пространства. Разработаны общие вопросы объединения теории релейных систем и законов робастного управления [11]. Получены новые методы определения коэффициентов $\mathbf{K}$ подсигнатурной функции релейных регуляторов. Определены законы релейно-робастного управления функционально и параметрически неопределенными электромеханическими объектами.

Основные результаты разработанной теории положены в основу создания высокоточных грубых, квазиинвариантных к координатным и параметрическим возмущениям систем управления сложными электромеханическими системами. В сравнении с существующими аналогами улучшены свойства инвариантности и робастности/грубости замкнутых систем управления различными функционально и параметрически неопределенными динамическими объектами. Экспериментальные исследования разработан-

ных новых законов управления позволили утверждать, что полученные результаты превышают аналогичные в прецизионных высокоточных электроприводах переменного тока известных мировых брендов. Весомым показателем привлекательности разработки является и тот факт, что улучшение точности регулирования, инвариантности и робастности замкнутых систем управления, например электромеханическими системами ключевых агрегатов и механизмов прокатных станов, позволяет повысить качество конечной продукции даже в условиях действия значительных параметрических и координатных возмущений, являющихся неотъемлемой составляющей любого технологического процесса. Это касается геометрии листа к данному примеру. Кроме того, удержание близких к номинальным/проектным показателям качества переходных процессов в любых технологических режимах позволит экономить средства за счет неувеличения динамических нагрузок на элементы механической части, что продлевает межремонтный срок службы механооборудования.

Библиографический список

1. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з електромашинними, електромагнітними та імпульсними перетворювачами: навч. посібн / А. Б. Зеленов, І. С. Шевченко, В. П. Яблонь, М. Г. Нікітін. Алчевськ: ДонДТУ, 2007. 373 с.

2. *Садовой А. В.* Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина; под ред. А. В. Садового. Киев: ИСИМО, 1996. 298 с.

3. Релейные системы оптимального управления электроприводами: моногр. / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина, А. Л. Дерец; Днепродзерж. гос. техн. ун-т. Днепродзержинск, 2011. 337 с.

4. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по точности, быстродействию, энергосбережению / В. В. Сурков, Б. В. Сухинин, В. И. Ловчаков, А. Э. Соловьев. Тула: ТулГУ, 2005. 300 с.

5. *Полилов Е. В.* Оценка границ больших уклонений фазовых переменных в линейных системах // Сб. науч. тр. Донб. гос. техн. ун-та. Алчевск: ДонГТУ, 2016. Вып. 46. С. 102–121.

6. *Полилов Е. В.* Маркеры устойчивости линейных динамических систем // Завалишинские чтения'16: сб. докл. (Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2016 г.). СПб.: ГУАП, 2016. С. 196–205.

7. *Полилов Е. В.* О границах достижимости теории автоматического управления // Вестн. НТУ «ХПІ». Харьков, 2015. № 12 (1121). С. 72–82.

8. Исследование явления всплеска в линейных динамических системах, управляемых по состоянию / Е. В. Полилов, А. И. Мотченко, Д. А. Мироненко и др. // Сб. науч. тр. студентов Донб. гос. техн. ун-та. Алчевск: ДонГТУ, 2015. Вып. 8. Ч. 1. С. 44–49.

9. *Полилов Е. В.* Феномен всплеска в управлении динамическими системами // Электротехнические и компьютерные системы. Киев: Техника, 2014. № 15 (91). С. 25–35.

10. Стратегии качественного управления многомассовыми электромеханическими системами / Е. В. Полилов, В. И. Бугаев, А. А. Меделяев и др. // Вестн. НТУ «ХПІ». Харьков, 2013. № 36 (1009). С. 86–96.

11. Разработка теории релейно-робастного управления функционально и параметрически неопределенными электромеханическими: отчет о науч.-исслед. работе (ГР № 0110U000095) объектами / Е. В. Полилов, А. И. Мотченко, Н. Н. Сергиенко и др. Алчевск: ДонГТУ, 2012. 337 с.

УДК 004.942, 51-74

С. Г. Поминов
капитан-лейтенант, адъюнкт кафедры военного кораблестроения
ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Е. А. Ичетовкин
старший оператор научной роты
ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРАБЛЯ КОМПЛЕКСНОГО СНАБЖЕНИЯ НА СТАДИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Разработка программ определения оптимальных технических характеристик на ранних стадиях проектирования актуальна для кораблей комплексного снабжения, отечественный опыт проектирования которых очень мал. Настоящая программа предназначена для просчета наиболее подходящего варианта корабля. Разработана методика начального проектирования и соответствующая ей математическая модель в виде программного комплекса. Для поиска применен метод вариантного проектирования, который заключается в том, что наиболее значительные проектные решения принимаются путем обоснованного выбора их из ряда составленных вариантов.

Ключевые слова: *математическая модель, начальная стадия проектирования, судно (корабль) комплексного снабжения.*

S. G. Pominov
Lieutenant, Adjunct of the Department of Military Shipbuilding
Navy Naval Academy

E. A. Ichetovkin
Senior Operator of Research Company
Navy Naval Academy

THE METHOD OF OPTIMIZATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE COMPREHENSIVE SUPPLY SHIP AT THE RESEARCH DESIGN STAGE

Develop programs to determine the optimal technical characteristics in the early design stages relevant for ships of complex supply, the domestic experience of designing which is very small. This program is intended for calculation of the most suitable option of ship. The methodology developed initial design and the corresponding mathematical model in a software system. For the search method applied in this trial design, which is that the most significant design decisions are made by informed choice them from a number of compiled options.

Keywords: *mathematical model, initial design stage, the vessel (ship) comprehensive supply.*

Корабль комплексного снабжения

Корабль комплексного снабжения универсален, он предназначен для пополнения запасов других военных судов прямо в море, он может доставлять армейское и другое военное оборудование в районы, а также выступать в качестве плавучего штаба флота. Многофункциональный корабль снабжения предназначен для стратегических морских перевозок, а именно для обеспечения морских операций и выполнения оперативных задач, связанных с материально-технической поддержкой сухопутных и других войск (рис. 1).

Для выполнения морских операций корабль снабжения оборудован двумя мачтами для передачи грузов, помимо этого между кораблями лебедочным способом на поддонах могут передаваться другие грузы – продовольствие, боеприпасы и пр. Инновационным средством передачи грузов, примененным на данном военном транспорте, стала вертикальная система заправки

Рис. 1. Корабль комплексного снабжения

вертолетов. Особенностью средства является заправка вертолетов без необходимости посадки.

Для перевозки материалов или контейнеров, а также гусеничного и колесного транспорта судно имеет специальное дорожное покрытие, а для их выгрузки применяется скрытая кормовая аппарель. Кроме того, новейший корабль снабжения оборудован лифтом для подачи грузов на вертолетную палубу и подвижным краном.

Военное судно не имеет доковой камеры, как у десантного вертолетоносца корабля-дока, однако для доставки войск и грузов на сушу судно оборудовано двумя малыми десантными судами, спускаемыми на шлюпбалках, и одним большим десантным судном для транспортировки военной техники, спускаемой из кормовой части.

Энергетическая установка военного транспорта включает дизель-генераторы и электродвигатели, обеспечивающие максимальную скорость хода, маневрирование за счет двух носовых и одного кормового подруливающего устройства. Элементы корабля представлены на рис. 2.

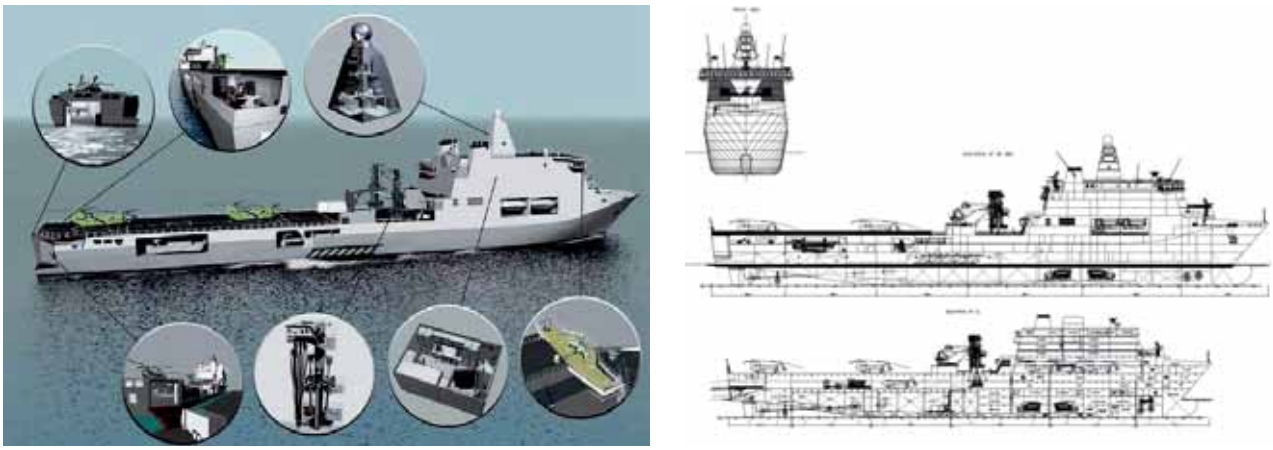


Рис. 2. Устройство корабля комплексного снабжения

Рис. 3. Специальные модули со всеми удобствами

В особенных операциях военный транспорт требует защиты, в связи с этим новейший корабль снабжения оснащен незначительным, но достаточно эффективным вооружением для отражения возможных атак от надводных кораблей противника. Таким образом, военное судно имеет системы для отражения ракетных и авиационных ударов на коротких дистанциях, системы разного калибра, обеспечивающие защиту от воздействия наземных целей. Кроме того, корабль снабжения вооружен пулеметами. Все системы вооружения оснащены дистанционным управлением из командного центра.

Для обеспечения морского базирования многофункциональный корабль снабжения имеет большую полетную и ангарную палубу. Он снабжен командным центром для обеспечения управления разнородными силами, современным госпиталем с хирургическими отделениями. Помимо этого на борту есть специальные модули со всеми удобствами для эвакуированных групп (рис. 3) [2].

Критерии оптимизации технических характеристик

В данной статье рассмотрена задача определения наиболее выгодного сочетания элементов корабля в предположении, что его грузоподъемность представляет собой строго заданную величину. Скорость хода и ряд параметров являются величинами известными и определяются исходя из целевого предназначения исследуемого типа кораблей.

В качестве ограничений на начальных стадиях проектирования могут быть приняты следующие [1]:

1. Ограничения главных размерений, определяемые навигационными требованиями и условиями постройки

$$B \le B_{\max},\ T \le T_{\max},$$

где B – ширина судна; $B_{\max}$ – ограничение ширины судна, накладываемое условиями постройки и возможностью прохождения узкостей или каналов; T – осадка судна; $T_{\max}$ – ограничение осадки судна, накладываемое предельными глубинами фарватеров и портов.

Конкретные значения $B_{\max}$ и $T_{\max}$ в данном тривиальном ограничении зависят от предполагаемых районов эксплуатации и параметров построечных мест на судостроительных заводах и верфях, где планируется постройка.

Так, для возможности прохождения судном Панамского канала ширина судна не должна превосходить 32,24 м, а при выборе в качестве места постройки конкретного завода ширина судов ограничена шириной его построечных мест.

Особенно следует учитывать ограничения по осадке в портах на предполагаемой линии эксплуатации.

2. Ограничения, принятые из опыта проектирования:

$$\left(\frac{L}{B}\right)_{\min} \le \frac{L}{B} \le \left(\frac{L}{B}\right)_{\max},\ \left(\frac{B}{T}\right)_{\min} \le \frac{B}{T} \le \left(\frac{B}{T}\right)_{\max},$$

где L – длина судна.

Из существующей ныне практики минимальные и максимальные соотношения находятся в пределах (получены на основе обработки статистических данных):

$$\left(\frac{L}{B}\right)_{\min} = 6{,}6;\ \left(\frac{L}{B}\right)_{\max} = 7{,}2;\ \left(\frac{B}{T}\right)_{\min} = 2{,}8;\ \left(\frac{B}{T}\right)_{\max} = 3{,}2.$$

Однако следует отметить, что конкретные значения соотношений главных размерений следует корректировать с учетом значений ограничений.

3. Ограничения, связанные с кратностью размерам контейнера: длина $L_{\text{тр}}$ и ширина $B_{\text{тр}}$ грузовых трюмов контейнеровоза с учетом зазоров и габаритов ячеистых конструкций должны быть кратны размерам стандартного 20-ft контейнера ($l_{\text{teu}} = 6{,}1$ м; $b_{\text{teu}} = 2{,}44$ м).

4. Ограничения, накладываемые на значение высоты надводного борта: диапазон возможных значений для высоты надводного борта F определяется минимально и максимально допустимыми ее значениями:

$$H_{\min} \le H \le H_{\max},$$

где $H_{\min}$ – минимально допустимое значение высоты надводного борта, которое определяется из требования к непотопляемости судна; $H_{\min}$ должно соответствовать значению минимального надводного борта, определенного по правилам о грузовой марке Российского морского регистра судоходства.

Требуемая высота надводного борта $H_{\min}$ для сухогрузных судов с учетом некоторых допущений может быть рассчитана по формуле

$$F_{\min} = 1{,}97 \cdot 10^{-2} L - 0{,}69.$$

$H_{\max}$ – максимальное значение высоты надводного борта – определяется из условия полного закрытия бортом контейнерного груза, так как при превышении этого ограничения конструктивно появляется возможность организации легких люковых закрытий грузовых трюмов. Значение $H_{\max}$ можно определить по формуле

$$H_{\max} = \left(n_{\text{яр}} h_{\text{TEU}} + h_{2\text{д}} + h_{\text{оп}} + h_{\text{ф}}\right) - T,$$

где $h_{2\text{д}}$ – высота второго дна; $h_{\text{оп}}$ – высота опорной тумбы на настиле второго дна; $h_{\text{ф}}$ – габаритная высота промежуточных опорных фиксаторов; h_{TEU} – принятая в математической модели проектирования высота контейнера, которая за-

висит от типа предполагаемых к перевозке контейнеров и находится в пределах

$$h_{\text{TEU}} = 2{,}44 - 2{,}9 \text{ м}.$$

5. Ограничения, принятые в расчетах контейнеровместимости:

– ордината яруса контейнеров с учетом всех зазоров и промежутков в заданном сечении должна быть меньше ординаты шпангоута на соответствующей ватерлинии на конструктивно заданную величину;

– использование ячеистых конструкций требует, чтобы количество контейнеров по ширине судна в каждом ярусе отличалось друг от друга на четное число.

6. Ограничение по обеспечению требуемой грузовместимости: грузовместимость должна быть не менее заданной:

$$К_{\text{р}} \geq К,$$

где $К_{\text{р}}$ – расчетная контейнеровместимость, определенная на основе размещения контейнеров в грузовых районах.

7. Ограничения по начальной остойчивости и остойчивости на больших углах крена:

– исправленная начальная метацентрическая высота h_0 должна быть не менее допустимого значения $h_{0\min}$

$$h_0 \geq h_{0\min};$$

– остойчивость на больших углах крена должна быть такой, чтобы определенный по диаграмме остойчивости угол крена на установившейся циркуляции θ_c или под действием постоянного бокового ветра θ_v был не более половины угла, при котором верхняя палуба входит в воду (θ_{zal} – угол заливания); в любом случае угол крена не должен превышать 15°;

– максимальное плечо диаграммы статической остойчивости l_{st} должно быть не менее требуемой:

$$l_{\text{st}} \geq l_{\text{st min}};$$

– условный угол заката диаграммы статической остойчивости θ_{zal}, определенный в предположении непроницаемости грузовых трюмов, должен быть не ниже 60°. Объясняется это тем, что данный тип судна не удовлетворяет требованиям по углу заката диаграммы, так как высота борта характеризуется углом заливания θ_{zal};

– суммарный объем цистерн двойного дна и двойных бортов должен быть больше объема принятого балласта для обеспечения остойчивости:

$$W_{2\text{б}} + W_{2\text{д}} \geq W_{\text{балл}},$$

где $W_{\text{балл}}$ – требуемый объем балласта; $W_{2\text{б}}$ – объем балластных цистерн двойных бортов; $W_{2\text{д}}$ – объем балластных цистерн двойного дна.

8. Ограничения, учитываемые в расчетах качки: период собственных колебаний судна на нерегулярном волнении τ должен быть больше минимально допустимого с точки зрения условий обитаемости и безопасности перевозки груза:

$$\tau \geq \tau_{\min}.$$

9. Ограничения по прочности: нормальные σ_i и касательные τ_i напряжения в связях корпуса должны быть не более допускаемых:

$$\sigma_i \leq [\sigma], \quad \tau_i \leq [\tau],$$

где $[\sigma]$ – допускаемые нормальные напряжения; $[\tau]$ – допускаемые касательные напряжения.

10. Ограничение по перекосу и заклиниванию: при кручении и при изгибе корпуса не должно происходить заклинивания и повреждения контейнеров от ячеистых направляющих.

Кроме указанных ограничений, в математическую модель проектирования могут вводиться и другие (дополнительные) ограничения, в том числе архитектурно-конструктивный тип судна, тип энергетической установки и т. п. [3, 6].

Предложенная методика и соответствующая ей математическая модель определения главных размерений позволяет реализовать оптимизационное проектирование.

В этом случае задача проектирования может быть сформулирована как экстремальная задача математического программирования. Предполагаемая методика и соответствующая математическая модель позволяют решать задачу проектирования в следующей детерминированной постановке.

Для выбранного архитектурно-конструктивного типа судна и вектора параметров задания на проектирование $C(c_1,\ldots, c_q)$ определить такой вектор искомых характеристик судна (вектор оптимизируемых переменных) $X(x_1,\ldots, x_n)$, при которых функция критерия эффективности Z достигает своего экстремального значения:

$$Z = \text{extr}\big(Z(X,C)\big).$$

При этом должны выполняться т функциональных требований к проектируемому судну

$$G_j(X,C) \geq A_j, \qquad j = 1, \ldots, m,$$

где A_j – требование K j-му показателю качества;

$G_j(X, C)$ – значение функционального j-го показателя качества;

q – количество элементов вектора задания;

m – количество функциональных требований.

На элементы вектора X накладываются двухсторонние ограничения вида

$$(x_i)_{\min} \leq x_{i\leq}(x_i)_{\max}, \qquad i = 1, \ldots, n,$$

где $(x_i)_{\min}$, $(x_i)_{\max}$ – пределы изменения оптимизируемой переменной x_i; n – количество накладываемых ограничений.

Математическая модель на стадии исследовательского проектирования

Рассмотрим применение метода вариаций для обоснования главных размерений универсального судна (корабля) снабжения в первом приближении. В качестве компонентов вектора оптимизируемых переменных выберем:

– относительную длину судна l;

– коэффициент общей полноты δ.

Диапазон варьирования компонентов:

$$l = 5{,}5...7{,}0;\ \delta = 0{,}5...0{,}6.$$

Схема вычислений в математической модели проектируемого судна.

1. Предварительно определяем водоизмещение базового варианта с помощью коэффициента утилизации η и по чистой грузоподъемности $G_{ГР}$, рассчитанного по прототипу:

$$D_0 = \frac{G_{\text{ГР}}}{\eta_{G\text{ГР}}}\ \text{, т.}$$

2. Определяем длину судна, используя варьируемую величину l_V:

$$L_V = l_V \cdot \left(\frac{D_0}{\gamma}\right)^{\frac{1}{3}}\text{, м,}$$

где $\gamma = 1{,}025$ т/м^3 – удельный вес морской воды.

3. Зная длину судна, можно найти коэффициент сопротивления трения для каждого варианта по формуле

$$\xi_{TV} = \frac{0{,}072}{\left(\log_{10} R_{ev} - 2\right)^2},$$

где Re_v – число Рейнольдса для рассматриваемого варианта, которое можно найти следующим образом:

$$R_{ev} = \frac{0{,}514 \cdot V_S \cdot L_V}{1{,}1 \cdot 10^{-6}}.$$

4. Коэффициент Фрудо для данного типа судна можно найти так:

$$F_{rv} = \frac{V_S \cdot 0{,}514}{\sqrt{gL_V}},$$

где $g = 9{,}8$ м/с^2 – ускорение свободного падения.

5. Задаем типовые для прототипа отношения высоты борта к осадке:

$$\frac{H_V}{T_V} = 1{,}4 \div 1{,}6.$$

6. Отношение $\dfrac{B_V}{T_V}$ для прототипа будет

$$\frac{B_V}{T_V} = \frac{1{,}7}{\delta_V},$$

тогда задаем типовые для прототипа отношения ширины к осадке:

$$\frac{B_V}{T_V} = 2{,}6 \div 2{,}3.$$

7. Относительная длина грузовых помещений, полученная с прототипа:

$$l_{\text{гр}} = 2{,}6 \div 2{,}3.$$

8. Относительная ширина грузовых помещений, полученная с прототипа:

$$b_{\text{гр}} = 2{,}6 \div 2{,}3.$$

9. Определим ширину варианта B_V:

$$B_V = \frac{L_V}{\dfrac{L_V}{B_V}} = \frac{L_V}{\sqrt{\dfrac{\delta_V l_V^3}{\left(\dfrac{1{,}7}{\delta_V}\right)}}}.$$

10. Зная ширину варианта B_V и отношение $\dfrac{B_V}{T_V}$, определим осадку варианта T_V:

$$T_V = \frac{B_v}{\left(\dfrac{B_V}{T_V}\right)} = \frac{B_v}{\left(\dfrac{1{,}7}{\delta_V}\right)}.$$

11. Определим высоту борта варианта:

$$H_V = \frac{H_V}{T_V} \cdot T_V.$$

12. Коэффициент остаточного сопротивления для каждого варианта найдем по формуле

$$\xi_{\text{ОСТ}} = \frac{2{,}8 \cdot \left(\delta_M \cdot F_{rv}\right)^3}{\left(\dfrac{L_V}{B_V}\right) \cdot \left(\dfrac{B_V}{T_V}\right)^{\frac{1}{3}}}.$$

13. Для расчета площади смоченной поверхности применим формулу типа

$$\Omega_V = L_V \cdot \left(1{,}36T_V + 1{,}13\delta_V \cdot B_V\right).$$

14. Общее сопротивление движению судна:

$$R_V = \left(\xi_{\text{ОСТ}} + \xi_{TV} + \xi_{\text{ВЧ}}\right)\frac{104 \cdot \left(0{,}514 \cdot V_S\right)^2}{1}\Omega_V.$$

15. Коэффициент полноты КВЛ для рассматриваемых вариантов примем по:

$$\alpha_V = 0{,}98 \cdot \delta_V^{\frac{1}{2}}.$$

16. Коэффициент полноты мидель-шпангоута для рассматриваемых вариантов по:

$$\beta_V = 1{,}014\delta_V^{\frac{1}{12}}.$$

17. Коэффициент продольной полноты для рассматриваемых вариантов:

$$\varphi_V = \frac{0{,}32}{\sqrt{[F_{rv}]}}.$$

18. Коэффициент попутного потока примем по:

$$\omega_V = 0{,}7\varphi_V - 0{,}3.$$

19. Коэффициент засасывания по:

$$t_V = 0{,}5\varphi_V - 0{,}18.$$

20. Коэффициент полезного действия винта для вариантов проекта:

$$\eta_V = 0{,}84 - 0{,}0001 \cdot n\sqrt{L_v},$$

где n – частота вращения винта, об/мин.

21. Коэффициент поперечного метацентрического радиуса:

$$K_p = \frac{\left(\frac{\alpha_V}{\varphi_V}\right)^{\frac{1}{3}}}{12}.$$

22. Общий пропульсивный коэффициент определим по:

$$\eta_v = \eta_{\text{ВАЛ}} \cdot \eta_{\text{ПЕР}} \cdot \eta_{\text{ПЕР}} \cdot \eta_{BV} \cdot i \cdot \frac{1 - t_v}{1 - \omega_v},$$

где $\eta_{\text{ВАЛ}}$ – КПД валопровода, $\eta_{\text{ПЕР}}$ – КПД передачи, i – коэффициент неравномерности потока.

23. Потребная мощность главных двигателей:

$$N_v = \frac{\frac{R_v \cdot 0{,}514 \cdot V_s}{\eta_v}}{75}, \text{ л. с.}$$

Таблица 1

Расчет массы подсистемы «Корпус и надстройки»

№	Наименование	Расчетная формула
1	Вес металлического корпуса в составе эквивалентного бруса	$G_{K1} = 1{,}04 \cdot 10^{-3} \cdot \delta^{\frac{4}{3}} \cdot L^{\frac{5}{2}} \cdot \frac{BT}{H}$
2	Главные поперечные переборки	$G_{K2} = 4{,}61 \cdot 10^{-2} \cdot \delta B H^{\frac{3}{2}} \cdot \eta_{\text{ПЕР}}$
3	Надстройки и газоходы	$G_{K3} = (0{,}12L - 7{,}6)n_{\text{ЭК}}$
4	Оконечности	$G_{K4} = 4{,}89 \cdot 10^{-3} \cdot LBH$
5	Палубы бака и юта	$G_{K5} = 4{,}28 \cdot 10^{-2} \cdot LB$
6	Местные конструкции	$G_{K6} = 1{,}28 \cdot 10^{-2} \cdot LBH$
7	Подкрепления и фундаменты	$G_{K7} = 4{,}89 \cdot 10^{-3} \cdot LBH$

Окончание табл. 1

№	Наименование	Расчетная формула
8	Дельные вещи	$G_{K8} = 3{,}38 \cdot 10^{-1} \cdot (LBH)^{\frac{2}{3}}$
9	Неметаллические части корпуса	$G_{K9} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot (LBH)^{\frac{2}{3}}$
10	Окраска, протекторы	$G_{K10} = 4{,}25 \cdot 10^{-2} \cdot (LBH)^{\frac{2}{3}}$
11	Изоляция и зашивки	$G_{K11} = 1{,}36 \cdot 10^{-1} \cdot (LBH)^{\frac{2}{3}}$
12	Цементировка	$G_{K12} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot (LBH)^{\frac{2}{3}}$
13	Воздух в корпусе	$G_{K13} = 1{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot \delta LBT$
14	Оборудование помещений	$G_{K14} = 3{,}92 n_{\text{ЭК}}$
15	Оборудование контейнерных трюмов	$G_{K15} = 0{,}713 n_{\text{К}}$
Примечания. Предполагается, что в качестве основного конструкционного материала используется сталь 09Г2 с пределом текучести 3000 кг/см^2; $n_{\text{ЭК}}$ – численность экипажа; $n_{\text{К}}$ – контейнеровместимость.		

Тогда суммарную массу корпуса и надстройки корабля найдем так:

$$G_K = \sum_{i=1}^{15} G_{Ki}.$$

Таблица 2

Масса устройств

№	Наименование	Расчетная формула
1	Устройство рулевое	$G_{y1} = 1{,}29 \cdot 10^{-4} \cdot LT \cdot 0{,}514 V_s^2$
2	Устройство якорное и швартовое	$G_{y2} = 8{,}75 \cdot 10^{-3} \cdot D_0$
3	Шлюпочное и спасательное устройства	$G_{y3} = 5{,}29 \cdot 10^{-1} \cdot n_{\text{ЭК}}$

24. Тогда суммарную массу устройств корабля найдем так:

$$G_{\text{У}} = \sum_{i=1}^{3} G_{yi}, \text{ т.}$$

Таблица 3

Масса систем

№	Наименование	Расчетная формула
1	Трюмные и пожарные системы	$G_{c1} = 1{,}84 \cdot 10^{-3} \cdot LBH$
2	Бытовые системы	$G_{c2} = 2{,}43 \cdot n_{\text{ЭК}}$
3	Прочие системы	$G_{c3} = 1{,}64 \cdot 10^{-4} \cdot LBH$

25. Тогда суммарную массу устройств корабля найдем так:

$$G_C = \sum_{i=1}^{3} G_{ci},\ \text{т.}$$

26. Масса раздела «Энергетическая установка»:

$$G_{\text{ЭУ}} = 0{,}0663 \cdot N_v,\ \text{т.}$$

27. Масса раздела «Электроэнергетическая система, связь и управление»:

$$G_{\text{ЭЭС}} = 5{,}16 \cdot 10^{-3} \cdot LBH,\ \text{т.}$$

28. Масса раздела «Вооружение»:

$$G_{\text{ВР}} = \frac{0{,}75 N_v}{1{,}05 L_v - 53{,}5},\ \text{т.}$$

29. Масса раздела «Запасные части»:

$$G_{\text{ЗЧ}} = 0{,}00132 \cdot LBH,\ \text{т.}$$

30. Масса раздела «Снабжение»:

$$G_{\text{СН}} = 0{,}000757 \cdot LBH,\ \text{т.}$$

31. Масса раздела «Постоянные жидкие грузы»:

$$G_{\text{ПЖГ}} = 0{,}106 \cdot (LBH)^{\frac{2}{3}}.$$

32. Запас водоизмещения принимается равным для всех вариантов:

$$G_{\text{ЗВ}} = 0{,}02 D_0,\ \text{т.}$$

33. Масса раздела «Топливо, вода, масло»:

$$G_{\text{ТВМ}} = 0{,}000261 N_v \cdot \frac{R_v}{V_s},\ \text{т.}$$

34. Масса раздела «Экипаж» принимается равной для всех вариантов:

$$G_{\text{ЭК}} = \left[(0{,}005 + 0{,}100)\text{А} + 0{,}15\right] \cdot n_{\text{ЭК}},$$

где А – автономность плавания, суток.

35. Суммарная нагрузка по варианту определится из соотношения:

$$G_V = G_K + G_{\text{У}} + G_C + G_{\text{ЭУ}} + G_{\text{ЭЭС}} + G_{\text{ВР}} + G_{\text{ЗЧ}} + \\ + G_{\text{СН}} + G_{\text{ПЖГ}} + G_{\text{ЗВ}} + G_{\text{ТВМ}} + G_{\text{ЭК}}.$$

36. Невязка по нагрузке:

$$\Delta G = G_V - D_0,\ \text{т.}$$

37. Вычисляется коэффициент Нормана по приближенной формуле:

$$\eta_{Hv} = \frac{G_V}{G_{\text{ТР}}},\ \text{т.}$$

38. Откорректированное водоизмещение (критерий эффективности):

$$D_v = D_0 + \Delta G \cdot \eta_{Hv}.$$

39. Откорректированная длина сопоставляемого варианта:

$$L_{V1} = l_V \cdot \left(\frac{D_v}{\gamma}\right)^{\frac{1}{3}},\ \text{м.}$$

40. Откорректированная ширина сопоставляемого варианта:

$$B_{V1} = \left(\frac{\frac{B}{T} \cdot D_v}{1{,}025 \delta_v \cdot L_{v1}}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

41. Откорректированная осадка сопоставляемого варианта:

$$T_{V1} = \frac{B_{v1}}{\left(\frac{1{,}7}{\delta_v}\right)}.$$

42. Высота двойного дна варианта:

$$h_{\text{дд}} = \frac{L_{v1} - 40}{570} + 0{,}04 B_{v1} + 3{,}5 \frac{T_{v1}}{L_{v1}}.$$

43. Фактическая удельная вместимость варианта в предположении кормового расположения машинного отделения, отсутствия двойных бортов и наличия двойного дна:

$$\mu_{\text{ГР}v} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\delta_v + 0{,}1}{\delta_v} \cdot \frac{l_{\text{ГР}} \cdot b_{\text{ГР}}}{\eta_{G\text{ГР}}} \cdot \left(\frac{H_v}{T_{v1}} - \frac{h_{\text{дд}}}{T_{v1}}\right).$$

44. Фактическая поперечная метацентрическая высота:

$$h_v = k_c \cdot \frac{1}{1 + \frac{\delta_v}{\alpha_v}} \cdot T_v + k_p \cdot \frac{\alpha_v^2}{\delta_v} \cdot \frac{B_{v1}^2}{T_{v1}} - a_G \cdot H_{v,}$$

где k_C и a_G – коэффициенты метацентрической высоты.

45. Период собственных поперечных колебаний судна определится:

$$t_v = c \cdot \frac{B_{v1}}{\sqrt{h_v}},$$

где c – коэффициент периода собственных колебаний.

Далее производим экономические расчеты, а точнее расчет экономической эффективности $\delta_{\text{ЭК}}$ и предварительной стоимости С. Для этого необходимо пересчитать коэффициент Фрудо:

$$F_{rv1} = \frac{V_S \cdot 0{,}514}{\sqrt{g L_{V1}}}.$$

46. Коэффициент экономической эффективности:

$$\delta_{\text{ЭК}} = 1 - 1{,}44 F_{rv1}.$$

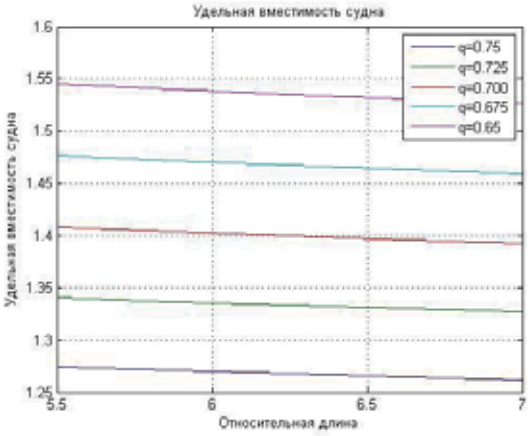


Рис. 4. Мощность главных двигателей

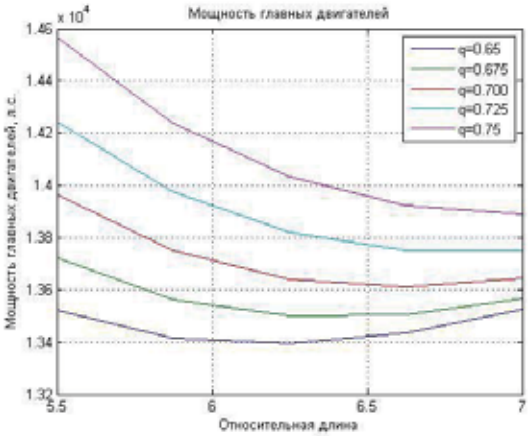


Рис. 5. Удельная вместимость

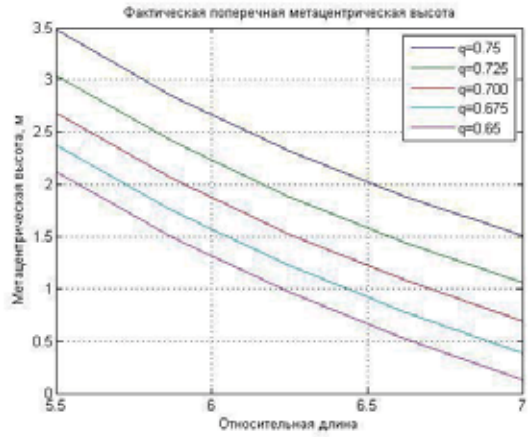


Рис. 6. Фактическая поперечная метацентрическая высота

47. Предварительную стоимость постройки:

$$C = \left(C_a - \frac{D_{v1}}{D_a} \right) \cdot K_{c0} \cdot K_{b1} + C_{01} \cdot K_{01},$$

млн руб.,

где D_a – водоизмещение аналога, т, C_a – экономическая плотность млн руб./т, C_{01} – стоимость аналога, млн руб., K_{c0}, K_{b1}, K_{01} – экономические коэффициенты.

Данная модель реализована посредством создания программы в MATLAB. Основные зависимости реализованной в MATLAB математической модели представлены на графиках: рис. 4–6 [4], [7].

Заключение

В ходе реализации метода моделирования на начальных стадиях проектирования была создана программа MATLAB, позволяющая производить поиск наиболее оптимальных вариантов главных размерений корабля в автоматизированном режиме. Получаемые результаты были проверены на ближайших аналогах проектируемого судна, которые показали высокую точность совпадения результатов как технических и инженерных расчетов, так и экономической составляющей. Программа, основанная на описанной выше методике, была включена в Фонд алгоритмов и программ ВМПИ ВУНЦ ВМФ «ВМА».

Библиографический список

1. *Ашик В. В.* Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1985. 320 с.

2. *Гайкович А. И.* Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 1. Описание системы «Корабль». СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. 819 с.

3. *Гайкович А. И.* Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 2. Анализ и синтез системы «Корабль». СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. С. 752–766.

4. *Дорин В. С., Пашин В. М., Солдатов В. Е.* Применение экономико-математических методов и ЭВМ при проектировании судов // Судостроение. 1967. № 11. С. 17–24.

5. *Краев В. И.* Экономические обоснования при проектировании морских судов. Л.: Судостроение, 1981. 280 с.

6. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. СПб.: Транспорт, 2016.

7. *Соколов В. П.* Постановка задач экономического обоснования судов. Л.: Судостроение, 1987. 164 с.

УДК 004.75

В. А. Романчук
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина

В. В. Лукашенко
инженер ОТК
ФГБОУ ВО Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ ПЛАНИРОВЩИКА РЕСУРСОВ КЛАСТЕРА НЕЙРОКОМПЬЮТЕРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ГЕКСАПОДОМ

В статье предложен способ решения задачи управления динамическим объектом электромеханической системы типа гексапод в режиме реального времени. Представлена модель расписания, составляемого планировщиком вычислительных ресурсов кластера нейрокомпьютеров. Представлена реализация модели расписания в виде вычислительной нейрокластерной структуры. Рассмотрен алгоритм динамического формирования вычислительной структуры кластера нейрокомпьютеров.

Ключевые слова: *распределенные вычисления, кластерные вычисления, кластеризация вычислительных ресурсов, нейровычисления, нейрокомпьютеры, кластеризация нейрокомпьютеров.*

V. A. Romanchuk
PhD, Tech.
Ryazan State University named after S. A. Yesenin

V. V. Lukashenko
Engineer OTK
Ryazan State University named after S. A. Yesenin

MODEL OF THE OPTIMUM SCHEDULE OF PLANNER OF RESOURCES OF THE CLUSTER OF NEURO COMPUTERS FOR SOLUTIONS OF THE MANAGEMENT PROBLEM OF HEXAPODE

The article suggests a method for solving the problem of controlling a dynamic object of an electromechanical system, such as hexapod in real time mode. The model of the schedule, compiled by the scheduler of computing resources of the cluster of neurocomputers, is presented. The implementation of the schedule model in the form of a computational neurocluster structure is presented. An algorithm for the dynamic formation of the computing structure of a cluster of neurocomputers is considered.

Keywords: *distributed computing, cluster computing, clustering of computing resources, neuro computing, neurocomputers, clustering of neurocomputers.*

Задача управления динамическим объектом электромеханической системы, такой, как гексапод, в режиме, приближенном к реальному времени, обусловлена жесткими требованиями обработки большого количества информации в высоком темпе. По существу, ни одна из современных управляющих вычислительных машин не может обеспечить обработку информации, поступающей с датчиков объекта управления в заданном темпе, поэтому приходится ее распараллеливать путем распределения. Одним из возможных решений является использование вычислительных машин, объединенных в кластер. Такое разделение функций позволяет обеспечить нестационарный режим вычислений без нарушения темпа основного вычислительного процесса.

В реальном масштабе времени должны решаться две основные задачи: вычисление управляющего воздействия и интегрирование системы дифференциальных уравнений. Сведение системы дифференциальных уравнений к системе

алгебраических уравнений в векторно-матричной форме удобно для ее реализации средствами цифровой вычислительной техники в специализированных вычислительных устройствах, в процессорных блоках которых должны выполняться операции «умножения с накоплением» одновременно над несколькими операндами.

Поэтому для реализации математического, алгоритмического и программного обеспечения предлагается использовать специализированную аппаратную базу вычислительного кластера: нейропроцессорные устройства на базе процессоров особого класса 6-го поколения, широко используемые в задачах обработки информации.

Выбор нейропроцессорных устройств предопределен рядом преимуществ использования, таких как скорость параллельной обработки, наличие операции «сложение с накоплением», высокая энергоэффективность [3]. В работе рассматривается конкретная реализация вычислительного кластера на базе нейрокомпьютеров МВ77.07 ЗАО «НТЦ Модуль», технические характеристики, преимущества и перспективность которых описана в работах [3].

Следующим важным вопросом, который встает на пути решения проблемы, является вопрос оптимального планирования вычислений в режиме реального времени. Данным процессом в вычислительном кластере заведует планировщик ресурсов. Планировщиком ресурсов называется алгоритм, выходным результатом которого является оптимальное расписание резервирования и направления на вычисления очередной задачи. Рассмотрим модель расписания и критерии, по которым составляется расписание планировщиком ресурсов.

Пусть для множества операций $Op =< Op_1, Op_2, \ldots, Op_p, \ldots, Op_P >$, связанных отношением последовательности выполнения операций Pos, задан отрезок планирования $[0,T], t \in [0,T]$ – переменная времени. Пусть s_i, f_i – моменты начала и окончания операции $Op_i, i = \overline{1,N}$. Тогда расписание в общем случае примет вид

$$Sh = \{(s_i, f_i), i = \overline{1,N}, s_i, f_i \in [0,T]\}. \quad (1)$$

Рассмотрим теперь критерии, влияющие на решение задачи (1). Первым и самым важным критерием являются ресурсы. Чаще всего ресурсы состоят из набора процессоров, памяти и дополнительных ресурсов. Задаются общие уровни наличия каждого типа ресурса во времени:

$$r_t = \{r_t^j, j = \overline{1,J}\}, t \in [0,T], \quad (2)$$

где j – число типов ресурсов. Причем r_t^j не зависит от времени, верхнюю границу j-го типа (число процессоров, пропускная способность коммуникационной системы) будем обозначать r_0^j.

Следующим критерием является система операций. Задается множеством $Op =< Op_1, Op_2, \ldots, Op_p, \ldots, Op_P >$ операций, которые необходимо выполнить. На множестве операций определяется отношение Pos – последовательность выполнения операций, представляемое в виде ориентированного бесконтурного графа (Op, E) с множеством Op вершин, соответствующих операциям, и множеством $E \subseteq Op \times Op$ дуг. При этом $Op_i Pos Op_j \Leftrightarrow (Op_i, Op_j) \in E$.

Для i-й операции задается длительность выполнения $\sigma_{i,j} > 0$ на j-ом типе ресурса. Каждая операция характеризуется потребностью r_{ij} в ресурсах типа j, причем $r_{ij} \le r_0^i$. Удельная стоимость (или вес) w_i операции чаще всего полагается постоянной. Тогда стоимость завершения операции равна $w_i f_i$ и представляет собой неубывающую от срока завершения операции функцию. $\sigma_{i,j}$, r_{ij} и w_i образуют вектор параметров операции, а совокупность таких векторов параметрически описывает систему операций и соответствующую графовую модель.

Еще одним критерием являются ограничения на составление расписаний. Расписание (1) является допустимым, если выполняются следующие условия:

$$(\forall Op_i \in Op) f_i \le T \quad (3)$$

$$(\forall Op_i, Op_j \in Op) Op_i Pos Op_j \Rightarrow f_i \le s_i \quad (4)$$

$$(\forall t \in [0,T], Op_t = \{Op_i \in Op \mid s_i \le t \le f_i\})$$
$$r^j(t) = \sum_{Op_i \in Op} r_{ij} \le r_t^i, \quad (5)$$

где Op_t – множество операций, выполняемых в момент времени t. $r^j(t)$ – потребность в ресурсе j-го типа, а r_t^i – уровень наличия ресурса j-го типа в момент времени t.

Исходя из этого и формулируется задача составления оптимального, в соответствии с (3)–(5), расписания (1).

Решим поставленную задачу для нашего кластера нейрокомпьютеров. Рассматриваемый кластер состоит из 10 нейрокомпьютеров, связанных между собой вычислительной подсетью с топологией 4-мерного гиперкуба. Скажем, что в нейрокомпьютерных системах обработка информации осуществляется посредством специализированных вычислительных структур, по сути своей являющихся расписанием, модель которого была представлена выше. Отметим также, что в данной статье не рассматривается алгоритм выбора вычислительной структуры нейрокластера под задачу, данный вопрос рассматривается в работе [7].

Вычислительная структура, полученная в результате работы алгоритма, описанного в [7], по своей структуре является полным взвешенным направленным графом. В этом случае ее удобно представить в виде матрицы смежности, строки и столбцы которой поименуем коэффициентами $i, j \in N$.

Алгоритм динамического формирования вычислительной структуры:

1. Считываем очередную подзадачу из очереди задач. Если таковых не осталось, то переходим на шаг 8.

2. Считываем строку матрицы смежности вычислительной структуры:

– если подпрограммы, соответствующие операциям в структуре, находятся в отношении параллельности, то возвращаемся на шаг 1;

– если подпрограммы находятся в отношении последовательности, то переходим на шаг 3.

3. Направляем рекурсивный запрос от диспетчера кластера Δ в сетевую топологию, т. е. совершаем обход матрицы смежности топологии вычислительной сети кластера. Хвост пакета запроса содержит совокупность параметров $\{C_i, M_i, D_i, N\}, i = \overline{1,N}$, где $C_i, i = \overline{1,N}$, $M_i, i = \overline{1,N}$, $D_i, i = 1,N$ определяют объемы свободной оперативной памяти и дисковой памяти в мегабайтах, $N_i, i = \overline{1,N}$ – разрядность данных, которые возможно разместить на каждый нейропроцессор вычислительного узла.

4. Резервируем вычислительную машину под каждую подзадачу соответственно очереди.

5. Направляем подзадачи и данные для их работы на зарезервированные вычислительные машины.

6. Этап вычислений.

7. Сигнализируем об окончании вычислений пакетом, содержащим результаты вычислений в диспетчер кластера Δ. Переходим на шаг 1.

8. Конец вычислений, выдача финального результата вычислений.

Следовательно, был совершен переход от топологии вычислительного кластера к вычислительной нейрокластерной структуре, которая полностью соответствует расписанию планировщика кластера (рис. 1).

Таким образом, в статье предложен способ решения задачи управления динамическим объектом электромеханической системы, такой как гексапод, в режиме, приближенном к реальному времени. Представлена модель расписания, составляемого планировщиком вычислительных ресурсов кластера нейрокомпьютеров. Представлена реализация модели расписания в виде вычислительной нейрокластерной структуры. Рассмотрен алгоритм динамического формирования вычислительной структуры кластера нейрокомпьютеров.

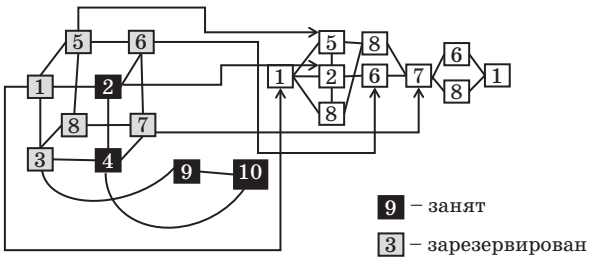


Рис. 1. Схема процесса резервирования вычислительных машин в топологии гиперкуба для вычислительной структуры нейрокластера

Библиографический список

1. *Бурцев В. С.* Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры суперЭВМ. М.: ИВВС РАН, 1997. 152 с.

2. *Воеводин В. В., Воеводин В. В.* Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.

3. *Галушкин А. И.* Нейронные сети: основы теории. М.: «Горячая линия Телеком», 2010. 496 с.

4. *Лукашенко В. В.* Анализ основных вопросов классификаций распределенных вычислительных систем // Современная техника и технологии. 2015. № 4 (44). С. 65–69.

5. *Лукашенко В. В.* Математическая модель реструктуризуемого под классы задач, виртуализуемого кластера вычислительной grid-системы на базе нейропроцессоров: сб. ст. Междун. науч.-техн. конф. «Наука, техника, инновации»; под общей ред. А. Л. Сафонова, 2014. С. 232–236.

6. *Ручкин В. Н., Романчук В. А., Лукашенко В. В.* Обобщенная модель вычислений кластера нейрокомпьютеров // Вест. Рязанского госуд. ун-та им. С. А. Есенина. 2015. № 2 (47). С. 146–150.

7. Разработка алгоритма выбора вычислительной структуры распределенного кластера с нейрокомпьютерной архитектурой / *В. Н. Ручкин, В. А. Романчук, В. А. Фулин, В. В. Лукашенко* // Известия Тульского госуд. ун-та. Технические науки. 2015. № 9. С. 236–244.

8. *Ручкин В. Н., Романчук В. А., Лукашенко В. В.* Модель вычислений реструктуризуемого под задачу кластера на базе нейрокомпьютеров // Современная техника и технологии. 2015. № 3 (43). С. 56–59.

9. *Топорков В. В.* Модели распределенных вычислений. М.: Физматлит, 2004. 320 с.

УДК 519.8

Б. В. Соколов
доктор технических наук, профессор
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

В. А. Палицын
аспирант
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

Д. И. Назаров
аспирант
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ОБСТАНОВКИ В ЛОКАЛЬНОЙ АКВАТОРИИ

В статье рассматривается задача совместного планирования измерительно-вычислительных операций, обеспечивающих решение задачи мониторинга обстановки в локальной акватории. Приводится содержательная и формализованная постановка рассматриваемой задачи и предлагается алгоритм ее решения. Модель и алгоритм решения поставленной задачи описываются в терминах классической теории оптимального автоматического управления.

Ключевые слова: *модель, планирование, теория управления.*

B. V. Sokolov
Dr. Sc., Tech., Professor
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS

V. A. Palitsyn
PhD Student
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS

D. I. Nazarov
PhD Student
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS

MATHEMATICAL MODEL AND ALGORITM OF OPERATION SCHEDULING FOR MONITORING SITUATION IN LOCAL WATERS

The article discusses the problem of joint planning of measuring and computing operations that provide a solution to the task of monitoring the situation in the local water area. A substantive and formalized statement of the problem is presented and an algorithm for its solution is proposed. The model and algorithm for solving the problem are described in terms of the classical theory of optimal automatic control.

Keywords: *model, planning, control theory.*

Введение

В настоящее время обеспечение требований безопасности на внутренних водах Российской Федерации является актуальной и остро назревшей проблемой, что связано в первую очередь со следующими факторами: существенно увеличились количество и интенсивность движения судов в прибрежных морских районах, озерах и реках, особенно в маломерных, используемых

для активного отдыха, туризма, транспортировки пассажиров, спортивных состязаний и в качестве судов специального назначения; в связи с повышением интенсивности судоходства во внутренних водах РФ усложнились задачи контроля за соблюдением правил пользования судами и технического надзора, осуществляемого МЧС, что ведет к возрастанию вероятности бедствий и чрезвычайных происшествий при плавании во внутренних водах РФ.

В настоящее время разработаны или находятся в стадии разработки различные элементы региональной системы безопасности мореплавания (РСБМ) в соответствии с разработанной Министерством транспорта РФ в 2004 году концепцией. По существующей концепции РСБМ включает в себя следующие элементы [1–3]:

– автоматизированные системы мониторинга (АСМ);

– системы управления движением судов (СУДС);

– автоматические идентификационные системы (АИС);

– системы связи при бедствии (ССБ);

– комплекс наземных и спутниковых радионавигационных систем;

– единая база данных судов и мониторинговой информации.

Вместе с тем, как показывает анализ, в настоящее время, к сожалению, автоматизированный сбор и хранение мониторинговой информации носят локальный характер, имеет место информационная несогласованность данных мониторинга, полученных разнородными автономными автоматизированными системами мониторинга (АСМ). Также проведенный анализ центров мониторинга и диспетчерских центров по сбору, хранению и обработке мониторинговой информации, используемых при этом технологий и средств показал неэффективность существующей системы анализа мониторинговой информации, особенно в части оперативности проведения анализа и принятия на его основе решений.

Компенсировать противоречие между существующей необходимостью в проведении оперативного анализа и прогнозирования надводной обстановки и современным состоянием организационно-технического инструментария, обеспечивающих безопасность мореплавания служб, может разработка и комплексное внедрение методов, алгоритмов, методик, программного обеспечения решения задач анализа, планирования и прогнозирования надводной обстановки на основе современных интеллектуальных технологий. Одной из наиболее важных задач, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, является задача совместного планирования измерительно-вычислительных операций, обеспечивающих мониторинг обстановки, складывающейся в локальной акватории и связанной с перемещением различных классов судов (далее – активных подвижных объектов (АПО)).

Содержательная постановка задачи

Содержательная постановка задачи планирования измерительно-вычислительных операций, обеспечивающих мониторинг обстановки, складывающейся в локальной акватории и связанной с перемещением различных классов судов, сводится к следующему: известен перечень средств и типов средств наблюдения за объектами, известны технические и организационные ограничения типов средств наблюдения, известны предельные допустимые значения количества активных подвижных объектов в акватории и количества ожидающих объектов, известны ограничения на расположение и перемещение подвижных объектов относительно друг друга и стационарных объектов в акватории, известен перечень операций, производимых средствами наблюдения, диспетчерским центром и объектами наблюдения, известен перечень возможных сценариев развития ситуации в локальной акватории (существует база знаний), заданы интервал времени, на котором осуществляется управление перемещением, и соответствующая система показателей качества управления указанным перемещением.

Требуется найти такую последовательность выполнения измерительно-вычислительных операций, обеспечивающих наилучшее решение (с точки зрения выбранных показателей) задачи мониторинга обстановки, складывающейся в локальной акватории и связанной с перемещением различных классов судов, при которой выполняются все заданные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, характеризующие особенности рассматриваемых процессов, а показатели качества планирования принимают экстремальные значения.

Для решения поставленной задачи воспользуемся фундаментальными и прикладными научными результатами [4–5], полученными ранее в теории оптимального управления динамическими объектами.

Формализованная постановка задачи

Для формализации задачи планирования измерительно-вычислительных операций (далее – задачи наблюдения) проведем прежде всего ее теоретико-множественное описание.

$A = \{A\mathrm{v}, \mathrm{v} \in N\}$ – множество задач, решаемых в ходе функционирования организационно-технической системы мониторинга надводной обстановки;

$B = \{B_i, i \in M\}$ – множество систем и средств наблюдения и связи, входящих в состав орга-

низационно-технической системы мониторинга надводной обстановки и обеспечивающих ее функционирование;

$\bar{B} = \{\bar{B}_i, i \in \bar{M}\}$ – множество объектов мониторинга, не входящих в состав системы, но с которым последняя осуществляет взаимодействие;

$C = \{C_\lambda^{(i)}, \lambda \in \Lambda_i, i \in M\}$ – множество каналов (технических средств), имеющихся на объектах B_i и используемых при решении задач, стоящих перед системой;

$D = \Big\{ D^{(\text{с})} \cup \{D_{æ'}^{(i)}\} \cup \{D_{æ}^{(i,j)}\}, i, j \in M, æ' \in K_i^{(\text{о})}, æ \in \in K_{<i,j>}^{(\text{о})} \Big\}$ – множество операций, выполняемых в системе;

$D^{(i)} = \{D_{æ'}^{(i)},\ æ' \in K_i^{(o)}\}$ – множество операций, выполняемых непосредственно на объекте B_i;

$D^{(i,j)} = \{D_{æ}^{(i,j)},\ æ \in K_{\langle i,j \rangle}^{(o)}\}$ – множество операций взаимодействия объектов B_i, B_j друг с другом.

Целесообразно для каждой из пар $< \bar{B}_i B j >$, $<B_i B_j>$,$<A\upsilon B_j>$, $\upsilon \in N$, i, $j \in \{M \cup \bar{M}\}$ ввести следующие функции:

– матричную временную функцию $e_{ij}(t)$, задающую пространственно-временные ограничения, связанные с взаимодействием объектов B_i (либо $\bar{B}_i$) с B_j; данная функция принимает значение 1, если B_i попадает в зону взаимодействия B_j, 0 – в противном случае;

– матричную временную функцию $Q_{iæj}\lambda(t)$ (либо $Q\upsilon_{æj}\lambda(t)$), которая характеризует технические возможности реализации задач и соответствующих операций взаимодействия ($A\upsilon$, $D^{(i)}$, $D^{(ij)}$); данная функция принимает значения 1, если на объектах B_i и B_j в момент времени $t \in T$ есть работоспособные каналы $C_\lambda^{(i)}$ и $C_\lambda^{(j)}$, с помощью которых можно выполнить операцию взаимодействия $D_{æ}^{(i,j)}$, 0 – в противном случае;

– матричную временную функцию $x_{ij}(t)$, которая принимает значение 0 в том случае, если возможно взаимодействие B_i и B_j в условиях наличия возмущающих воздействий, 1 – в противном случае.

Введем в рассмотрение следующие векторы и множества:

$$\boldsymbol{x}(t) = \|x^{(\text{д})\text{т}}, x^{(\text{о})\text{т}}, x^{(\text{и})\text{т}}\|^{\text{т}}, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{y}(t) = \|y^{(\text{д})\text{т}}, y^{(\text{о})\text{т}}, y^{(\text{и})\text{т}}\|^{\text{т}}, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{u}_{\text{пр}}(t) = \|u_{\text{пр}}^{(\text{д})\text{т}}, u_{\text{пр}}^{(\text{о})\text{т}}, u_{\text{пр}}^{(u)\text{т}}\|^{\text{т}}, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\upsilon}(x(t),t) = \|\upsilon^{(\text{д})\text{т}}(x(t),t), \upsilon^{(\text{о})\text{т}}(x(t),t), \upsilon^{(\text{и})\text{т}}(x(t),t)\|^{\text{т}}, \quad (4)$$

$$\xi(t) = \|\xi^{(\text{д})\text{т}}(t), \xi^{(\text{о})\text{т}}(t), \xi^{(\text{и})\text{т}}(t)\|^{\text{т}}, \quad (5)$$

$$\beta = \|\beta^{(\text{д})\text{т}}, \beta^{(\text{о})\text{т}}, \beta^{(\text{и})\text{т}}\|^{\text{т}}, \quad (6)$$

где $\boldsymbol{x}(t)$, $\boldsymbol{y}(t)$ – соответственно обобщенный вектор состояния и выходных характеристик динамической системы; $\boldsymbol{u}_{\text{пр}}(t)$, $\boldsymbol{\upsilon}(x(t),t)$ – обобщенные векторы программных управлений системы (которые есть по сути планы функционирования основных элементов и подсистем, входящих в систему) и управлений, реализующих планы на этапе применения в условиях возмущающих воздействий $\xi(t)$); $\xi(t)$ – вектор возмущающих воздействий, имеющих как целенаправленный, так и нецеленаправленный характер; β – вектор структурных параметров (характеристик) системы, определяющих ее облик.

Индексы, используемые в обозначениях данных векторов: «д», «о», «и», – соответствуют моделям подсистем управления движением, операциями взаимодействия, измерениями в системе, входящими в обобщенную концептуальную модель функционирования указанной системы.

Все указанные векторы, исходя из ранее описанной концептуальной модели функционирования системы, должны удовлетворять заданной системе пространственно-временных, технических и технологических ограничений или, другими словами, должны принадлежать заданным областям:

$$\boldsymbol{u}_{\text{пр}}(t) \in Q^{(\text{пр})}(x(t),t),\ \upsilon(x(t),t) \in V(x(t),t), \quad (7)$$

$$\xi(t) \in \Xi(x(t),t),\ \beta \in B, \quad (8)$$

$$\boldsymbol{x}(t) \in X^{(\text{тр})}(t), \quad (9)$$

где $Q^{(\text{пр})}(x(t))$ – заданная область допустимых программных управлений; $V(x(t),t)$ – заданная область допустимых управляющих воздействий, реализуемых в РМВ; $\Xi(x(t),t)$ – область допустимых возмущающих воздействий; B – область допустимых значений структурных параметров; $X^{(\text{тр})}(t)$ – область допустимых текущих значений вектора состояния системы.

Динамика изменения векторов состояния и выходных характеристик системы может быть задана с помощью следующих переходных и выходных функций, которые в общем случае могут задаваться как в аналитическом, так и в алгоритмическом виде (возможен комбинированный вариант):

$$x(t) = \text{j}(x(t), u_{\text{пр}}(t), \upsilon(x(t),t), \xi(t), \beta, t), \quad (10)$$

$$y(t) = \psi(x(t), u_{\text{пр}}(t), \upsilon(x(t),t), \xi(t), \beta, t). \quad (11)$$

Кроме перечисленных ограничений необходимо задать ограничения, накладываемые на вектор $x(t)$ в начальный – T_0 и конечный – T_f моменты времени, соответствующие временному интервалу наблюдения:

$$x(T_0) \in X_0(\beta),\ x(T_f) \in X_f(\beta). \quad (12)$$

Для оценивания эффективности процессов управления системой на этапе применения введем в рассмотрение следующий вектор показателей эффективности ее функционирования:

$$J(x(t), u(t), \xi(t),t) = \|J^{(\text{д})\text{т}}, J^{(\text{о})\text{т}}, J^{(\text{и})\text{т}}\|^{\text{т}}, \quad (13)$$

где $J^{(\text{д})}$, $J^{(\text{о})}$, $J^{(\text{и})}$ – соответственно векторы показателей эффективности управления движением, операциями взаимодействия и измерениями.

С учетом содержательной постановки задачи формальная постановка задачи планирования наблюдений может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти такую последовательность управляющих воздействий (планов выполнения измерительно-вычислительных операций), при которой динамическая система (10)–(11) была переведена из заданного начального в заданное конечное состояние (см. (12)) и при этом были выполнены все основные ограничения, связанные с решением задачи наблюдения (см. (7)–(8)), а показатели качества планирования принимали экстремальные значения (см. (13)).

Модели планирования (программного управления) работы, основных элементов и подсистем автоматизированной системы мониторинга обстановки в локальной акватории

Рассмотрим подробнее описание моделей подсистем.

Из содержательной постановки задачи управления системой следует, что операции взаимодействия (ОВ) объектов друг с другом могут выполняться лишь при попадании указанных объектов в зоны взаимодействия (ЗВ), которые задаются матричной временной функцией $E(t) = \|e_{ij}(t)\|$, $i,j \in \{M \cup \bar{M}\}$, которую называют контактным потенциалом. Элементы данной матрицы принимают значение 1, если объекты B_i и B_j попадают в ЗВ друг друга, 0 – в противном случае. Геометрические размеры и формы ЗВ определяются целым рядом факторов: видом взаимодействия (энергетическое, вещественное, информационное), техническими характеристиками аппаратно-программных средств, обеспечивающих это взаимодействие, пространственным расположением объектов и т. п.

Пусть состояние движения B_i объекта в любой момент времени определяется совокупностью двух векторов $r_i^{(д)}(t)$ и $\dot{r}_i^{(д)}(t)$, $i \in \tilde{M} = \{M \cup \bar{M}\}$, где $r_i^{(д)}(t)$ в общем случае трехмерный радиус-вектор, характеризующий положение B_i объекта в пространстве, $\dot{r}_i^{(д)}(t)$ – вектор, характеризующий скорость движения объекта. Введем в рассмотрение вектор $x_i^{(д)} = \left\| r_i^{(д)т} \dot{r}_i^{(д)т} \right\|^{т}$. Тогда состояние движения объекта B_i в каждый момент времени $t \in (T_0, T_f]$ будет определяться $x_i^{(д)}$. В этих условиях модель управления движением объектами (модель Мд) будет включать в себя следующие основные элементы.

Модель процесса движения объектов:

$$\dot{x}_i^{(д)} = f_i^{(д)}\left(x_i^{(д)}, u_i^{(д)}, t\right). \qquad (14)$$

Ограничения:

$$q^{(д)}\left(x^{(д)}, u^{(д)}, t\right) \le 0. \qquad (15)$$

Краевые условия:

$$h_0^{(д)}\left(x^{(д)}(T_0)\right) \le 0, \quad h_1^{(д)}\left(x^{(д)}(T_f)\right) \le 0. \qquad (16)$$

Показатели качества программного управления:

$$J_1^{(д)} = \varphi^{(д)}\left(x^{(д)}(T_f)\right); \qquad (17)$$

$$J_2^{(д)} = \int_{T_0}^{T_f} f_0^{(д)}\left(x^{(д)}(\tau), u^{(д)}(\tau), \tau\right) d\tau, \qquad (18)$$

где $x^{(д)} = \left\| x_1^{(д)т}, x_2^{(д)т}, \ldots, x_{m+\bar{m}}^{(д)т} \right\|^{т}$ – вектор, характеризующий состояние движения ОБО, $M = 1,\ldots,m$, $\bar{M} = 1,\ldots,\bar{m}$; $u^{(д)} = \left\| u_{пр}^{(д)т}(t), v^{(д)т}(x(t), t) \right\|^{т}$; $u^{(д)} = \left\| u_1^{(д)т}, \ldots, u_{m+\bar{m}}^{(д)т} \right\|^{т}$. Функции, перечисленные в (14)–(15), предполагаются известными, заданными в аналитическом виде, непрерывно дифференцируемыми во всем пространстве переменных, относительно компонент векторов управляющих воздействий $u^{(д)}(t)$ будем предполагать, что они являются измеримыми по Лебегу функциями, определенными на интервале $(T_0, T_f]$.

В этом случае контактный потенциал пары объектов $<B_i, B_j>$ может быть вычислен по формуле

$$\varepsilon_{ij}(t) = \gamma_+\left\{R_j^{(д)} - \left|\mathbf{r}_i^{(д)}(t) - \mathbf{r}_j^{(д)}(t)\right|\right\}, \qquad (19)$$

где $i,j \in \tilde{M}$, $\gamma_+(\tilde{\alpha}) = 1$, если $\tilde{\alpha} \ge 0$, $\gamma_+(\tilde{\alpha}) = 0$, если $\tilde{\alpha} < 0$; $R_j^{(д)}(t)$ – заданный радиус зоны взаимодействия объекта B_j, представляющий из себя в общем случае замкнутый шар.

Из анализа (13)–(19) следует, что стационарные (неподвижные) элементы можно рассматривать как частный случай подвижных объектов, для которых $r_i(t) = r_i(t_0) = r_{i0}$, $t \in (T_0, T_f]$, r_{i0} – вектор, определяющий местоположение объекта. Уравнения (13)–(19) записаны в общем виде, так как их конкретизация возможна только при задании определенной системы сил, действующих на объекты при движении, выборе системы отсчета и т. п., что в конечном итоге определяется спецификой перемещения каждого объекта, ОБО.

Модель управления операциями, проводимыми системой, включает в себя следующие основные элементы.

Модель процесса управления операциями передачи и обработки данных:

$$\dot{x}_\nu^{(0,1)} = \sum_{j=1}^{m} u_{\nu j}^{(0,1)}; \; \dot{x}_{i\text{æ}}^{(0,\nu)} =$$

$$= \sum_{j=1}^{m} \sum_{\lambda=1}^{l_j} \varepsilon_{ij}(t) \Theta_{i\text{æ}\,j\lambda}(t) u_{i\text{æ}\,j\lambda}^{(0,\nu)}; \; \dot{x}_{\nu j}^{(0,3)} = u_{\nu j}^{(0,3)}; \qquad (20)$$

$\upsilon = 1,\ldots,n;\ j = 1,\ldots,m;\ i = 1,\ldots,m;\ æ = 1,\ldots,s_i.$

Ограничения:

$$\sum_{j=1}^{m} u_{\nu j}^{(0,1)} \left[\sum_{\alpha \in \Gamma_{\nu 1}} \left(a_{\alpha}^{(0,1)} - x_{\alpha}^{(0,1)}(t) \right) + \right.$$

$$\left. + \prod_{\beta \in \Gamma_{\nu 2}} \left(a_{\beta}^{(0,1)} - x_{\beta}^{(0,1)}(t) \right) \right] = 0; \qquad (21)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{i æ j\lambda}^{(0,\nu)} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{i æ 1}} \left(a_{i\tilde{\alpha}}^{(0,\nu)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(0,\nu)}(t) \right) + \right.$$

$$\left. + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{i æ 2}} \left(a_{i\tilde{\beta}}^{(0,\nu)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(0,\nu)}(t) \right) \right] = 0; \qquad (22)$$

$$\sum_{\nu=1}^{u} u_{\nu j}^{(0)}(t) \le 1,\ \forall j;\ \sum_{j=1}^{m} u_{\nu j}^{(0)}(t) \le 1,\ \forall j;$$

$$u_{\nu j}^{(0,1)}(t) \in \{0,1\}; \qquad (23)$$

$$u_{i æ j\lambda}^{(0,2,\nu)}(t) \in \left\{ 0, u_{\nu j}^{(0,1)} \right\};\ u_{\nu j}^{(0)}(t) \in \{0,1\};$$

$$u_{\nu j}^{(0,3)} \left(a_{j s_i}^{(0,2,\nu)} - x_{j s_j}^{(0,2,\nu)}(t) \right) = 0. \qquad (24)$$

Краевые условия:

$$h_0^{(o)} \left(x^{(o)}(T_0) \right) \le 0;\ h_1^{(o)} \left(x^{(o)}(T_f) \right) \le 0. \qquad (25)$$

Показатели качества программного управления:

$$J_1^{(o)} = \sum_{\nu=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} u_{\nu j}^{(0,3)}(T_f);\ J_{<2,\alpha,\nu>}^{(o)} =$$

$$= \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} \left(x_{\alpha i}^{(0,3)}(T_f) - x_{\nu j}^{(0,3)}(T_f) \right);$$

$$J_3^{(o)} = T_f - \sum_{j=1} x_{nj}^{(0,1)}(T_f) \qquad (26)$$

$$J_{<4,i,\nu>}^{(o)} = \sum_{\nu,j,\lambda,æ} \int_{T_0}^{T_f} \varepsilon_{ij}(\tau) \Theta_{i æ j\lambda}(\tau) u_{i æ j\lambda}^{(0,2,\nu)}(\tau) d\tau,$$

$$j = 1,\ldots,m;\upsilon = 1,\ldots,n;æ = 1,\ldots,s_i \qquad (27)$$

$$J_{<5,i>}^{(o)} = \int_{T_0}^{T_f} \max_j \varepsilon_{ij}(\tau) d\tau,\ j \ne i; \qquad (28)$$

$$J_{<6,i>}^{(o)} = \sum_{\nu,j,æ} \int_{T_0}^{T_f} \left[\varepsilon_{ij}(\tau) - \varepsilon_{ij}(\tau) u_{i æ j\lambda}^{(0,2,\nu)}(\tau) \right] d\tau; \qquad (29)$$

$$J_1^{(o)} = \sum_{i=1}^{m} \sum_{æ=1}^{s_i} \left(a_{i æ}^{(0,\nu)} - x_{i æ}^{(0,\nu)}(T_f) \right)^2; \qquad (30)$$

$$J_2^{(o)} = \sum_{\nu=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \sum_{æ=1}^{s_i} \sum_{j=1}^{m} \sum_{\lambda=1}^{l_j} \int_{T_0}^{T_f} \tilde{\tilde{\alpha}}_{i æ j\lambda}^{(\nu)}(\tau) u_{i æ j\lambda}^{(0,\nu)}(\tau) d\tau; \qquad (31)$$

$$J_9^{(o)} = \sum_{\nu=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \sum_{æ=1}^{s_i} \sum_{j=1}^{m} \sum_{\lambda=1}^{l_j} \int_{T_0}^{T_f} \tilde{\tilde{\beta}}_{i æ}^{(\nu)}(\tau) u_{i æ j\lambda}^{(0,2,\nu)}(\tau) d\tau, \qquad (32)$$

где $x_{\nu}^{(0,1)}(t)$ – переменная, значение которой в момент времени t численно равняется длительности решения задачи Av на объектах B_j $(j = 1,\ldots,m)$; $x_{i æ}^{(0,2,\nu)}(t)$ – переменная, характеризующая состояния выполнения операции $D_{æ}^{(i)}$ (либо $D_{æ}^{(i,j)}$) при решении задачи Av; $x_{\nu}^{(0,3)}(t)$ – переменная, численно равная длительности интервала времени от момента завершения решения задачи Av на объекте B_j до момента $t = T_f$

$a_{\alpha}^{(0,1)}, a_{\beta}^{(0,1)}, a_{i\tilde{\alpha}}^{(0,2,\nu)}, a_{i\tilde{\beta}}^{(0,2,\nu)}, a_{is_i}^{(0,2,\nu)}, a_{i æ}^{(0,1,\nu)}$ – заданные величины (краевые условия), значения которых должны (либо могут) принять соответствующие переменные $x_{\alpha}^{(0,1)}(t), x_{\beta}^{(0,1)}(t)$ $x_{i\tilde{\alpha}}^{(0,2,\nu)}(t), x_{i\tilde{\beta}}^{(0,2,\nu)}(t), x_{is_i}^{(0,2,\nu)}(t), x_{i æ}^{(0,1,\nu)}(t)$ в конце интервала управления АПО в момент времени $t = T_f$; $u_{\nu j}^{(0,1)}(t)$, $u_{i æ j\lambda}^{(0,2,\nu)}(t)$, $u_{\nu j}^{(0,3)}(t)$ – управляющие воздействия, при этом $u_{\nu j}^{(0,1)}(t) = 1$, если задача Av решается на объекте B_j; $u_{\nu j}^{(0,1)}(t) = 0$ – в противоположном случае; $u_{i æ j\lambda}^{(0,2,\nu)}(t) = 1$, если операция $D_{æ}^{(i)}$ (либо $D_{æ}^{(i,j)}$) выполняется при решении задачи Av с использованием соответствующего канала, $u_{i æ j\lambda}^{(0,2,\nu)}(t) = 0$ – в противоположном случае; $u_{\nu j}^{(0,3)}(t) = 1$ в момент времени, соответствующий окончанию решения задачи Av на объекте B_j и во все последующие моменты времени до $t = T_f$, $u_{\nu j}^{(0,3)}(t) = 0$ – в противоположных ситуациях; $\Gamma\upsilon_1$, $\Gamma\upsilon_2$ – множество номеров задач $A_{\tilde{\nu}}$, непосредственно предшествующих и технологически связанных с задачей Av с помощью логических операций «И», «ИЛИ» (либо альтернативное «ИЛИ») соответственно; $\Gamma_{i æ 1}, (\Gamma_{i æ 2})$ – множество номеров операций взаимодействия, проводимых с объектом B_i, непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией $D_{æ}^{(i,j)}$ (либо $D_{æ}^{(i)}$) с помощью логических операций «И», («ИЛИ» либо альтернативное «ИЛИ») соответственно; $h_0^{(o)}, h_1^{(o)}$ – известные дифференцируемые функции, с помощью которых задаются краевые условия, накладываемые на вектор

$$x^{(o)} = \left\| x_1^{(0,1)}, \ldots, x_n^{(0,1)}, x_{11}^{(0,2)}, \ldots, x_{ms_m}^{(0,2)}, x_{11}^{(0,3)}, \ldots, x_{nm}^{(0,3)} \right\|^{\mathrm{T}}$$

в моменты времени $t = T_0$ и $t = T_f$.

В качестве модели подсистемы измерений рассмотрим модель управления параметрами операций, связанными с проведением измере-

ний, обработкой и оцениванием компонент вектора состояния движения B_i объекта с использованием канала $C_\lambda^{(j)}$, расположенного на объекте B_j. В этом случае одним из важнейших параметров, характеризующих указанные измерительные операции, является точность определения вектора состояния движения объекта B_i.

Пусть линеаризованные модели движения объекта B_i и модель измерителей (каналов наблюдения за траекторией движения объекта B_i) имеют следующий вид:

$$\dot{x}_i^{(\text{д})} = F(t)x_i^{(\text{д})}; \tag{33}$$

$$y_{j\lambda}^{(i)}(t) = d_{j\lambda}^{\text{т}}(t)x_i^{(\text{д})} + \xi_{j\lambda}, \tag{34}$$

где $x_i^{(\text{д})} = \left\| r_i^{(\text{д})\text{т}} \dot{r}_i^{(\text{д})\text{т}} \right\|^{\text{т}}$ – вектор состояния движения объекта B_i; $F_i(t)$ – заданная матрица; $x_{j\lambda}$ – некоррелированные ошибки измерений канала $C_\lambda^{(j)}$, которые подчиняются нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной $\sigma_{j\lambda}^2$; $d_j(t)$ – заданный вектор, связывающий вектор определяемых параметров $x_i^{(\text{д})}$ с измеряемыми параметрами $y_{j\lambda}^{(i)}(t)$. В этом случае модель управления параметрами операций примет следующий вид.

Модель процесса управления параметрами измерительных операций:

$$\dot{Z}_i = -Z_i F_i - F_i^{\text{т}} Z_i - \\ -\sum_{j=1}^{n} \sum_{æ \in \Gamma_{iæ}} \sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{iæj\lambda}^{(\text{и})} \frac{d_{i\lambda} d_{j\lambda}^{\text{т}}}{\sigma_{j\lambda}^2}, \; Z_i = \tilde{\tilde{K}}_i^{-1}. \tag{35}$$

Ограничения:

$$0 \le u_{iæj\lambda}^{(u)} \le c_{j\lambda}^{(\text{и})} u_{iæj\lambda}^{(\text{о})}. \tag{36}$$

Краевые условия:

вариант «а»:

$$t = T_0, \;\; \tilde{\tilde{K}}_i(T_0) = \tilde{\tilde{K}}_{i0}, \tag{37}$$

$$t = T_f, \;\; b_\gamma^{\text{т}} \tilde{\tilde{K}}_i b_\gamma \le \sigma_{\gamma i}^2; \tag{38}$$

вариант «б»:

$$t = T_0, \;\; \tilde{\tilde{K}}_i(T_0) = \tilde{\tilde{K}}_{i0}, \tag{39}$$

$$t = T_f, \;\; \int_{T_0}^{T_f} \sum_{i,æ,j,\lambda} u_{iæj\lambda}^{(u)}(\tau) d\tau \le \tilde{J}_1^{(\text{e})}. \tag{40}$$

Показатели качества управления параметрами операций:

вариант «а»:

$$J_1^{(\text{e})} = \int_{T_0}^{T_f} \sum_{i,æ,j,\lambda} u_{iæj\lambda}^{(u)}(\tau) d\tau; \tag{41}$$

вариант «б»

$$J_{2\gamma i}^{(\text{e})} = b_\gamma^{\text{т}} \tilde{\tilde{K}}_i b_\gamma, \tag{42}$$

где Z_i – матрица, обратная по отношению к корреляционной матрице $\tilde{\tilde{K}}_i$ ошибок оценки вектора состояния движения объекта B_i; $u_{iæj\lambda}^{(\text{e},1)}$ – интенсивность проведения измерений параметров движения объекта B_i; $\Gamma_{iæ}$ – множество номеров измерительных операций, проводимых с объектом B_i; $c_{j\lambda}^{(\text{e})}$ – заданные константы, характеризующие технические возможности канала $C_\lambda^{(j)}$ по проведению измерительных операций; $b_\gamma = \|0,0,\ldots,0,1,0,\ldots,0\|^{\text{т}}$ – вспомогательный вектор, выделяющий из матрицы $\tilde{\tilde{K}}_i$ требуемый элемент γ; $\sigma_{\gamma i}^2$ – заданная точность определения γ-й компоненты вектора состояния движения объекта B_i; $\tilde{\tilde{K}}_{i0}$ – заданная матрица, характеризующая ошибки оценки вектора состояния движения объекта B_i в момент времени $t = T_0$; $\tilde{J}_1^{(\text{e})}$ – заданная величина, характеризующая суммарные затраты ресурсов объекта B_j при проведении всей совокупности измерительных операций.

Показатель (40) позволяет количественно оценить суммарные затраты ресурсов системы на проведение измерительных операций; целевая функция (41) характеризует точность определения γ-го элемента вектора состояния движения объекта B_i.

Алгоритм решения задачи

Основываясь на анализе моделей подсистем, можно предложить следующий алгоритм решения задачи.

Шаг 1. Расчет вектора состояния движения АПО в наблюдаемой акватории в заданный момент времени.

Шаг 2. Построение матрицы контактных потенциалов $\|\varepsilon\|$, где $\varepsilon_{ij} = 1$, если АПО i находится в зоне взаимодействия станции наблюдения j, и $\varepsilon_{ij} = 0$ в противном случае.

Шаг 3. Построение вектора $\dot{x}_{iæ}^{(0,\nu)} = \sum_{j=1}^{m} \sum_{\lambda=1}^{l_j} \varepsilon_{ij}(t) \times \\ \times \Theta_{iæj\lambda}(t) u_{iæj\lambda}^{(0,\nu)}$, характеризующего состояние выполнения операций в наблюдаемой акватории и, таким образом, определяющего допустимые управляющие воздействия в заданный момент времени.

Шаг 4. Расчет вектора сопряженных переменных $\psi_j^{(0)}(t)$.

Шаг 5. Вычисление числа Гамильтона для определенных на шаге 3 допустимых вариантов вектора управляющего воздействия.

Шаг 6. Решение задачи о назначениях с вычисленными в шаге 5 гамильтонианами в качестве входных параметров (нахождение элементов, для которых число Гамильтона максимально).

Шаг 7. Определение вектора управления на основе решения задачи о назначениях в текущий момент времени.

Шаг 8. Выполнение шагов 1–7 для следующего момента времени.

Результатом выполнения алгоритма является описание работы (порядок выполнения измерительно-вычислительных операций) элементов и подсистем автоматизированной системы мониторинга обстановки в локальной акватории для заданного временного интервала.

Заключение

В процессе исследования получены следующие результаты:

1. Произведена содержательная и формализованная постановка задачи планирования измерительно-вычислительных операций (задачи наблюдения), обеспечивающих мониторинг обстановки, складывающейся в локальной акватории и связанной с перемещением различных классов судов.

2. Разработаны модели планирования измерительно-вычислительных операций, обеспечивающих мониторинг обстановки.

3. Предложен алгоритм решения задачи планирования наблюдений за перемещениями подвижных объектов в локальной акватории. В основу алгоритма положен численный метод решения задачи оптимального программного управления (метод Крылова – Черноусько).

Предложенный алгоритм может быть использован при разработке системы мониторинга и управления движением судов в акватории, автоматизирующей работу диспетчерского центра.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01), программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№№ 15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214), госзадания Министерства образования и науки РФ № 2.3135.2017/К, в рамках бюджетных тем №№ 0073–2014–0009, 0073–2015–0007, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP, Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ.

Библиографический список

1. Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации. Федеральный закон от 7 марта 2001 г. № 24-ФЗ. М., 2001.

2. Приказ Минтранса РФ № 129 от 14.10.2002 «Об утверждении правил плавания по внутренним водным путям Российской Федерации» (в ред. Приказа Минтранса РФ № 114 от 31.03.2003).

3. Автоматизированная информационная система Государственной инспекции по маломерным судам МЧС России (АИС ГИМС). М.: Вестн. МЧС. № 4, 2007.

4. *Калинин В.* Н, Соколов Б. В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 56–61.

5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

УДК 681.532.55

Д. О. Якимовский[1]
кандидат технических наук,
начальник научно-исследовательского отдела

Д. С. Положенцев[2]
инженер 1-й категории

Д. Й. Джукич[3]
инженер 2-й категории
[1,2,3]*АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург*

НИЗКОСКОРОСТНОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД УСТРОЙСТВА ПОВОРОТНОГО СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Применительно к задаче создания низкоскоростного исполнительного электропривода рассмотрена проблема создания системы управления для контроля угловых скоростей и ускорений. Представлена структурная схема электропривода, к габаритно-массовым характеристикам которого предъявлены жесткие требования. Приведены результаты экспериментальной отработки исполнительного электропривода.

Ключевые слова: *система управления скоростью, система контроля ускорения, обратная связь по углу.*

D. O. Yakimovsky[1]
PhD, Tech., The Head of Research Department

D. S. Polozhentcev[2]
Engineer of the 1st category

D. J. Dzhukich[3]
Engineer of the 2d category
[1,2,3]*Joint-Stock Society "Command Devices Research Institute", St. Petersburg*

LOW-SPEED ELECTRIC DRIVE OF THE SOLAR BATTERY DEVICE

With regard to the task of creating a low-speed executive electric drive the problem of creating a control system for monitoring angular velocities and accelerations is considered. There are presented block diagram of such electric drives to which strict requirements are imposed on the weight-dimension characteristics. The results of the operation of a real executive electric drive are presented.

Keywords: *velocity control system, acceleration control system, angle feedback.*

Современный исполнительный электропривод (ИЭП) устройства поворотного солнечной батареи (УПСБ) космического аппарата (КА) характеризуется низкими рабочими скоростями вращения выходного вала (ВВ), которые могут быть на уровне десятых, сотых и даже тысячных долей градуса в секунду. Другой особенностью ИЭП УПСБ является наличие требования по ограничению ускорения вращения ВВ и наличие высокого момента сухого трения, возникающего в контактно-щеточном устройстве передачи энергии от солнечной батареи к системе энергообеспечения КА. Высокие требования по ограничению габаритно-массовых характеристик бортовых приводов, стойкости к факторам космического пространства, длительный срок активного существования КА существенно влияют на структуру и состав электропривода. Современные бортовые электропривода строятся на основе вентильного двигателя. Для обеспечения требуемой точности и динамики работы привода, а также функционирования вентильного электродвигателя используют один измеритель углового положения. Его разрешающая способность огра-

ничена указанными требованиями и обычно не превышает 16–18 разрядов.

В данной работе рассмотрены вопросы создания ИЭП УПСБ, включающего в состав индукционный датчик угла с малой разрешающей способностью. В качестве примера рассматривается привод, который должен создавать угловую скорость вращения ВВ в диапазоне ± (0; 0,0039...0,5)°/с, при этом дискретность не более 0,000244°/с. Значение углового ускорения вращения ВВ должно быть в диапазоне от 0,0012 до 0,01°/с^2, а погрешность создания угловой скорости в установившемся режиме должна быть не более 10% для всего диапазона. Момент сухого трения на валу может достигать 0,5 Н·м, внешний возмущающий момент от –0,3 до 0,3 Н·м.

Управление скоростью вращения. Структурная схема системы управления скоростью предполагает наличие измерителя скорости. Информацию о скорости вращения можно вычислить по показаниям датчика угла. Для снижения ошибки в установившемся режиме в контуре управления следует применить ПИ-регулятор.

Однако в случае использования в контуре обратной связи кодового датчика угла целесообразным видится другая система управления угловой скоростью вращения: интегрирование задающего скорость сигнала и последующая работа в режиме следящей системы по угловому положению ВВ. В качестве регулятора контура угла в этом случае может использоваться ПД-регулятор [1, 2].

Структурная схема такого ИЭП УПСБ, работающего в режиме следящей системы по линейно изменяющемуся углу, представлена на рис. 1, где И – интегратор скорости; РУ – регулятор контура угла; ВШИМ – векторный широтно-импульсный модулятор; КУМ – ключевой усилитель мощности; ДВ – двигатель; СБ – солнечная батарея; ДУ ВВ – датчик угла ВВ; ЭП ДУ ВВ – электронный преобразователь датчика угла выходного вала; УС – устройство сопряжения; МК – микроконтроллер; БУУП – блок управления устройством поворотным; ИЭП – исполнительный электропривод; N_ω – код задаваемой угловой скорости вращения ВВ; $N_\varphi^{зад}$ – расчетный код поворота ВВ; ΔN_φ – сигнал рассогласования контура угла; $N_{ШИМ}$ – входное значение кода ВШИМ; T_a; T_b; T_c – длительности сигналов ВШИМ, управляющие КУМ; $U_{амп1}$; $U_{амп2}$; $U_{амп3}$ – амплитудные значения линейных напряжений, подаваемых на двигатель; $\alpha_{ВВ}$ – значения углового положения ВВ; $\omega_{СБ}$ – значения угловой скорости СБ; $M_{упр}$ – значение упругого момента, создаваемого СБ; $N_{ВВ}$ – код измеренного угла поворота ВВ; МПИ – магистральный последовательный интерфейс.

При расчете коэффициента интегрирования скорости следует учитывать, что разрядные сетки задаваемого значения скорости и измеренного значения углового положения могут иметь различное число разрядов, при этом разрядные сетки задающего и измеренного значений углового положения обязательно должны быть одинаковыми.

Коэффициент интегрирования скорости вычисляется по следующей формуле:

$$К_\omega = \frac{К_{кр}}{\delta}, \quad (1)$$

где $К_{кр}$ – крутизна характеристики «код-скорость», δ – дискретность преобразования «угол-код» датчика угла.

Крутизна характеристики «код-скорость» определяется как:

$$К_\omega = \frac{\omega_{зад.max}}{2^n - 1}, \quad (2)$$

где $\omega_{зад.max}$ – максимальная задаваемая скорость, n – используемое число разрядов регистра, хранящего значение задаваемой скорости (без учета знакового разряда).

Результаты математического моделирования отработки ИЭП задаваемой скорости 0,1°/с представлены на рис. 2. Видно, что управление угловой скоростью вращения ВВ УПСБ происходит с требуемой точностью. Однако на диаграмме ускорения видно многократное превышение углового ускорения ВВ по отношению к заданной величине.

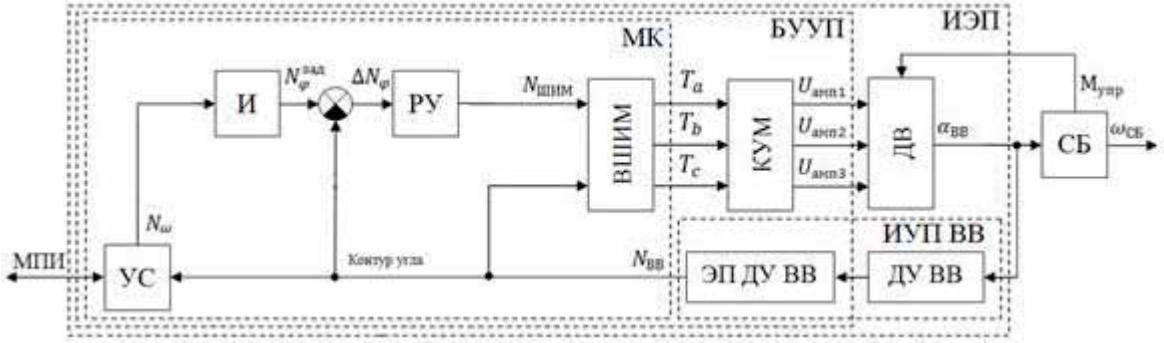


Рис. 1. Структурная схема ИЭП, работающего в режиме следящей системы по изменяющемуся углу

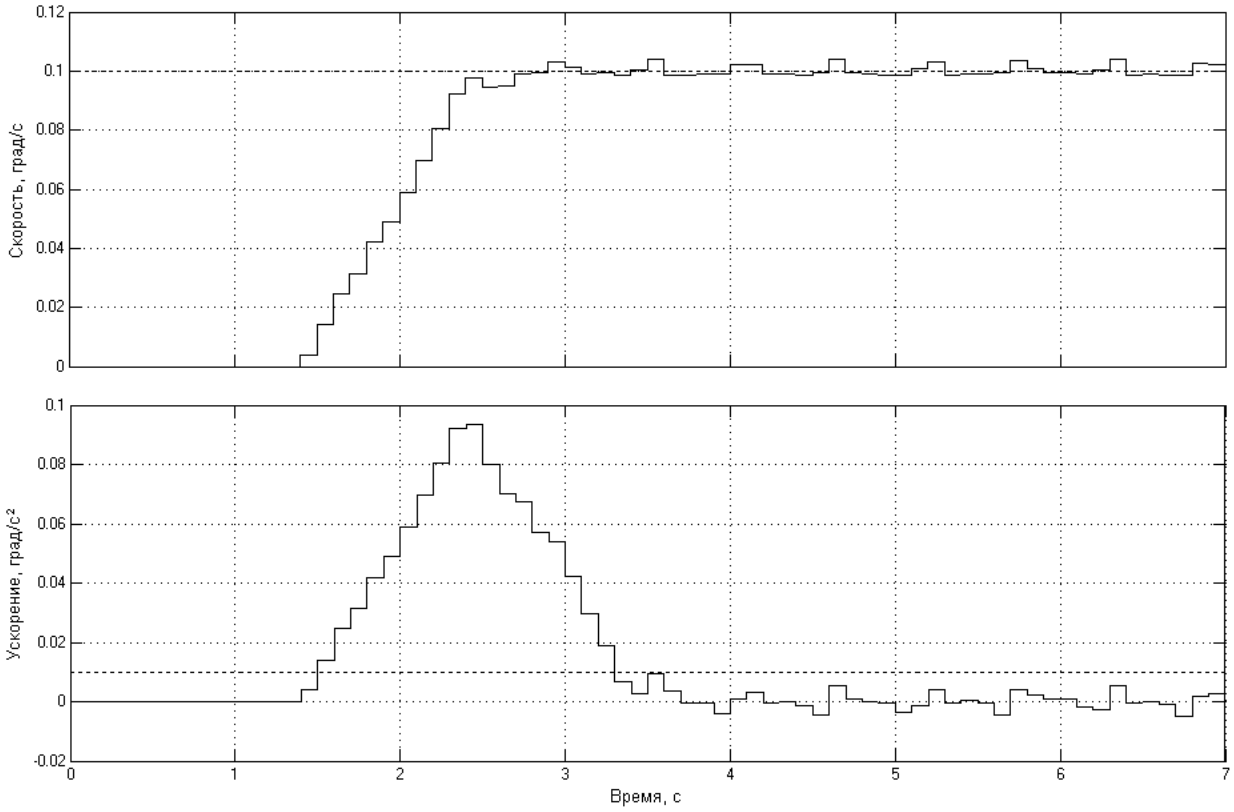


Рис. 2. Результаты моделирования отработки ИЭП задаваемой скорости 0,1°/с

Управление угловым ускорением. Наиболее простым решением данной задачи могло бы быть ограничение амплитуды тока в обмотках исполнительного двигателя и, как следствие, ограничение развиваемого им момента (т. е. ускорения). Однако в силу того, что момент трения представляет собой не постоянную величину (точное значение которой не известно) в зависимости от углового положения ВВ, настроить подобный «ограничитель тока» не представляется возможным.

Для разрешения этой проблемы в структуру ИЭП был введен формирователь кода скорости ($Ф_\omega$), как показано на рис. 3. Формирователь кода скорости после поступления N_ω формирует линейно нарастающий (убывающий) код угловой скорости $N_\omega^{расч}$ с ограничением на уровне, соответствующем коду N_ω.

Для обеспечения ограничения углового ускорения вращения ВВ ($\varepsilon_{ВВ}$) в диапазоне от 0,0012 до 0,01°/с^2 скорость нарастания (убывания) расчетного кода угловой скорости вала двигателя определяется по разностному уравнению:

$$N_\omega^{расч}(n) = k_{ИФ} \cdot T_s \cdot N_\omega(n) + N_\omega^{расч}(n-1), \quad (3)$$

где n – номер такта работы ИЭП;

T_s – период дискретизации;

$k_{ИФ}$ – коэффициент интегратора формирователя.

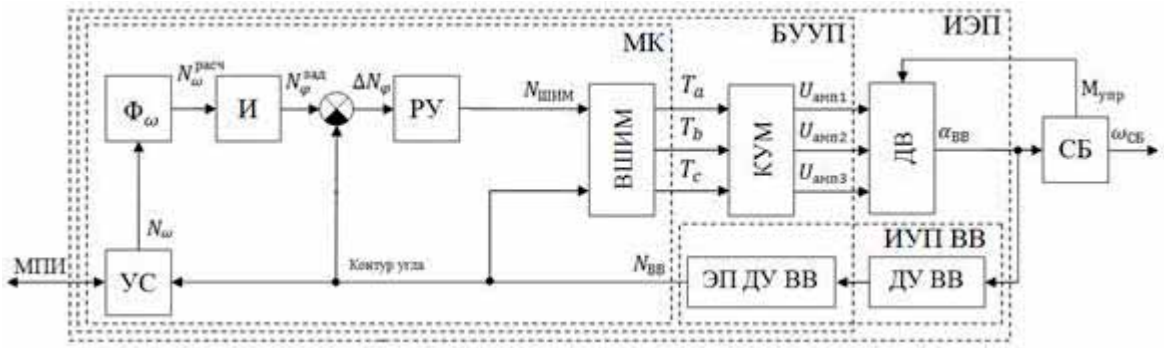


Рис. 3. Структурная схема ИЭП с формирователем скорости, работающим в режиме следящей системы по изменяющемуся углу

$$k_{\text{ИФ}} = \varepsilon_{\text{ВВ}} \cdot \frac{1}{\omega_{\text{ВВ}}}, \qquad (4)$$

где $\omega_{\text{ВВ}} = N_{\omega}(n) \cdot D_{\text{ВВ}}$.

Для обеспечения требования технического задания по ускорению ВВ от 0,0012 до 0,01°/с^2 по результатам моделирования было выбрано среднее значение углового ускорения ВВ:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{ВВ}} = 0{,}005, \text{ при } N_{\omega} > N_{\omega}^{\text{расч}}, \\ \varepsilon_{\text{ВВ}} = -0{,}005, \text{ при } N_{\omega} < N_{\omega}^{\text{расч}}, \\ \varepsilon_{\text{ВВ}} = 0, \text{ при } N_{\omega} = N_{\omega}^{\text{расч}}. \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{cases} k_{\text{ИФ}} = \dfrac{\varepsilon_{\text{ВВ}}}{N_{\omega}(n) \cdot D_{\text{ВВ}}}, \text{ при } N_{\omega} > N_{\omega}^{\text{расч}}, \\ k_{\text{ИФ}} = \dfrac{-\varepsilon_{\text{ВВ}}}{N_{\omega}(n) \cdot D_{\text{ВВ}}}, \text{ при } N_{\omega} < N_{\omega}^{\text{расч}}, \\ k_{\text{ИФ}} = 0, \text{ при } N_{\omega} = N_{\omega}^{\text{расч}}. \end{cases}$$

Результаты математического моделирования отработки ИЭП с формирователем задаваемой скорости 0,1°/с представлены на рис. 4. Видно, что управление как угловой скоростью, так и угловым ускорением ВВ УПСБ происходит с требуемой точностью. При этом время от подачи команды задания угловой скорости до начала движения составляет более 5 с, это связано с большой величиной момента сухого трения.

Преодоление момента сухого трения. В рассматриваемом УПСБ значение момента сухого трения достигает 0,5 Н·м (значение может меняться от прибора к прибору и зависит от углового положения ВВ), что составляет ≈ 30% от номинального момента исполнительного двигателя. Подобная величина момента трения может приводить к существенному (десятки секунд) увеличению времени реакции ВВ на заданный код скорости.

Для решения задачи в контур регулирования включено нелинейное звено (НЗ), которое формирует код $N_{\text{нз}}$ для повышения номинальной крутизны привода в области малых угловых рассогласований путем изменения рассчитанного кода $N_{\text{ШИМ}}$ в зависимости от знака кода рассчитанной угловой скорости. Таким образом, структурная схема рассматриваемого ИЭП преобразовывается к виду, представленному на рис. 5, где НЗ – нелинейное звено, $N_{\text{вых}}$ – выходное значение кода регулятора угла.

НЗ описывается выражением

$$N_{\text{нз}} = K_{\text{нз}} \cdot \text{sign}\left(N_{\omega}^{\text{расч}}\right), \qquad (5)$$

где величина $K_{\text{нз}}$ определяется при регулировке ИЭП. Эта величина не должна превышать величину момента сухого трения, но должна компенсировать большую его часть.

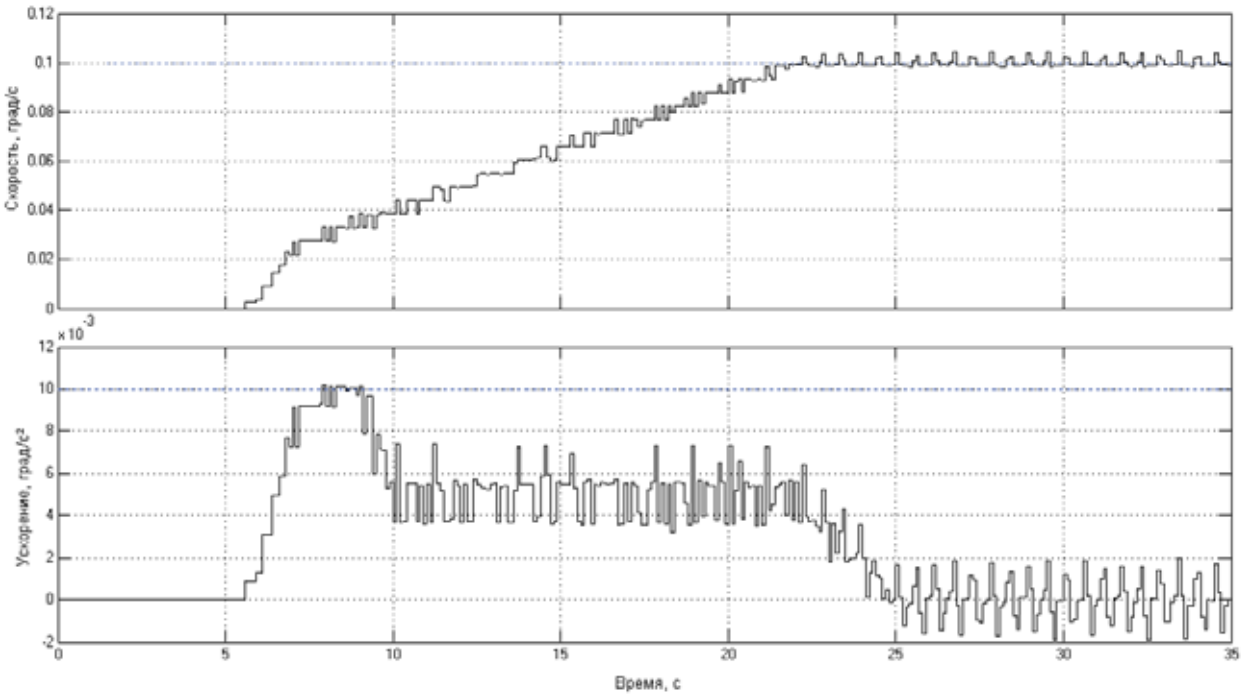


Рис. 4. Результаты моделирования отработки ИЭП с формирователем задаваемой скорости 0,1°/с

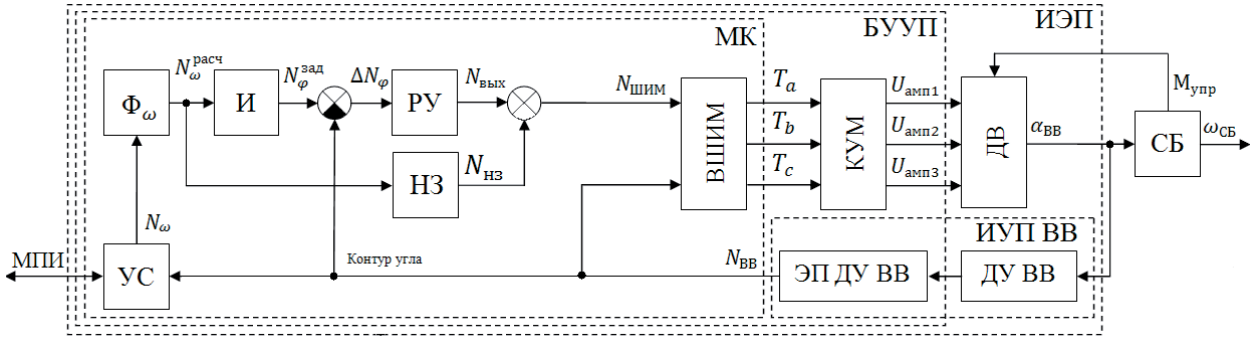


Рис. 5. Структурная схема ИЭП с формирователем скорости и нелинейным звеном, работающим в режиме следящей системы по изменяющемуся углу

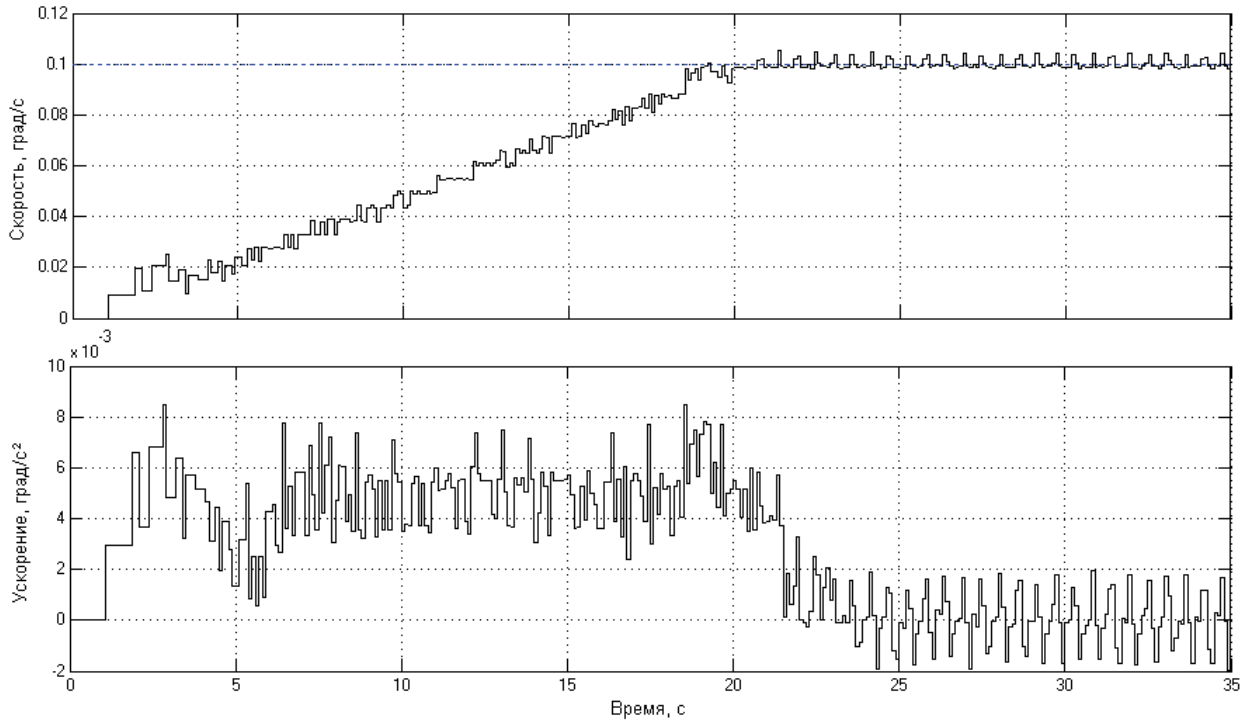


Рис. 6. Результаты моделирования отработки ИЭП с НЗ и формирователем задаваемой скорости 0,1°/с

Результаты математического моделирования отработки ИЭП с НЗ и формирователем задаваемой скорости 0,1°/с представлены на рис. 6. Видно, что время троганья ВВ заметно сократилось, а перерегулирование по ускорению уменьшилось.

На рис. 7–9 представлены результаты экспериментальной отработки ИЭП УПСБ с инерциальной нагрузкой задаваемых скоростей вращения +0,5, −0,1 и −0,0039°/с соответственно. Видно, что ускорение, как и скорость, контролируется системой управления с достаточно высокой точностью. Погрешность отработки угловой скорости вращения ВВ в установившемся режиме составила 0,34%, 1,3% и 2,56% для рис. 7–9 соответственно.

Таким образом, результаты моделирования и испытаний опытных образцов ИЭП УПСБ показали эффективность принятых схемотехнических решений. Предложенная структура привода позволяет обеспечить точное управление скоростью вращения с управляемым значением ускорения в условиях действия большого нестабильного момента сухого трения.

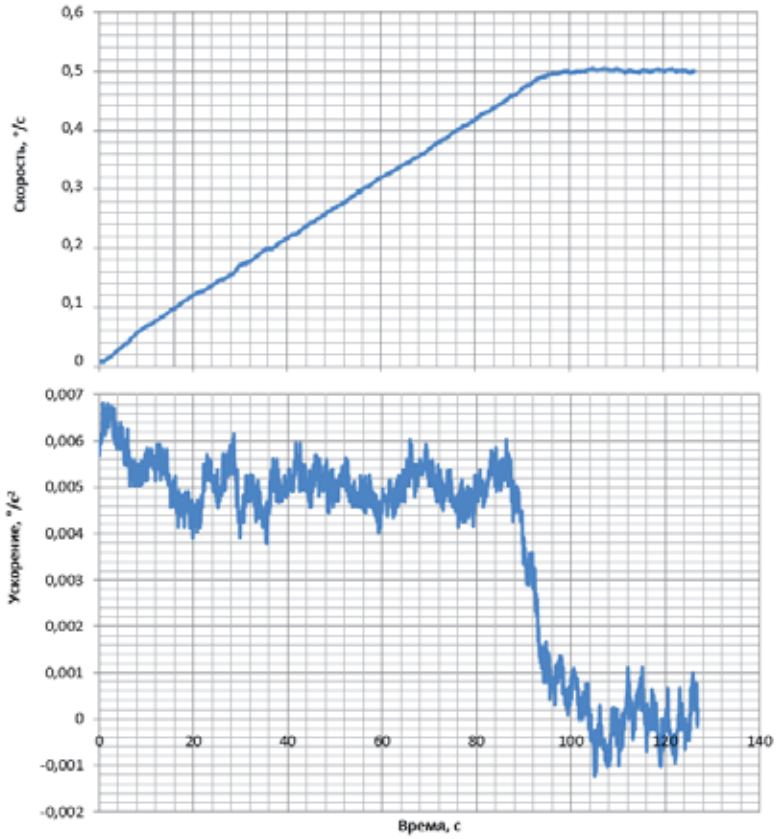


Рис. 7. Отработка реальным ИЭП УПСБ задаваемой скорости вращения + 0,5°/с

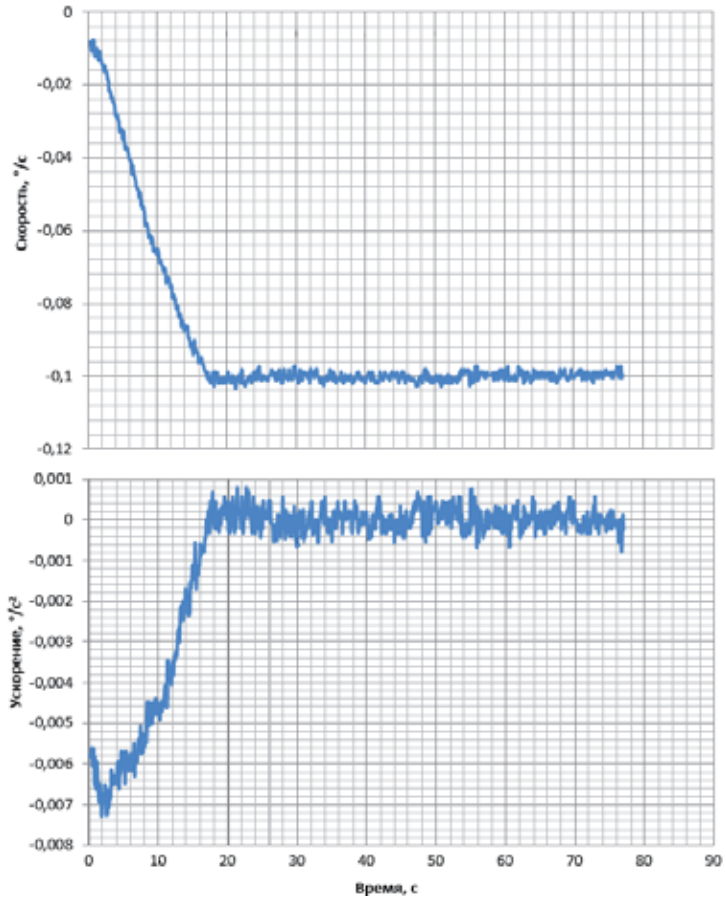


Рис. 8. Отработка реальным ИЭП УПСБ задаваемой скорости вращения – 0,1°/с

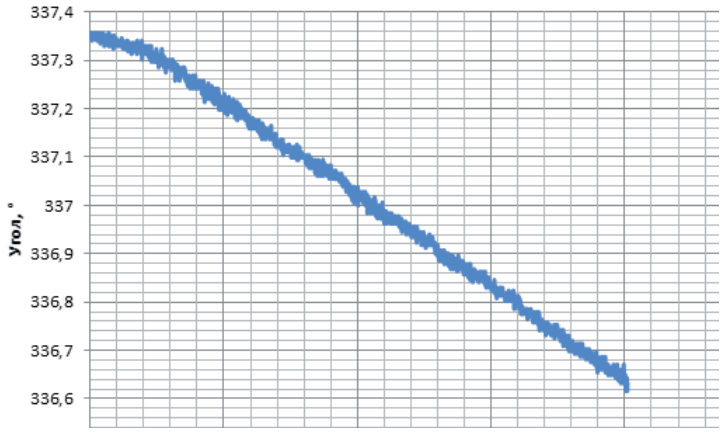


Рис. 9. Отработка реальным ИЭП УПСБ задаваемой скорости вращения – 0,0039°/с

Библиографический список

1. *Трахтенберг Р. М.* Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. М.: Энергоиздат, 1982. 168 с.

2. *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

УДК 621.311:519.216

А. А. Булгаков
старший преподаватель
Донецкий национальный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ КВАДРАТИЧНОГО КУМУЛЯТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрена задача квадратичного кумулятивного усреднения (ККУ) случайных электроэнергетических процессов и основные этапы ее решения методом имитации. Показано, что плотность распределения приведенного кумулятивного процесса не подчиняется нормальному закону распределения при относительно небольших интервалах усреднения. Рассмотрены особенности расчета асимметрии, эксцесса и расчетных максимумов (квантилей) по ансамблю реализаций случайного эргодического процесса. Дано имитационное решение задачи ККУ в виде θ-характеристик приведенного кумулятивного процесса. Показан практический пример использования θ-характеристик для оценки показателя качества электроэнергии по несимметрии.

Ключевые слова: *электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, случайный эргодический процесс, ансамбль реализаций, асимметрия, эксцесс, θ-характеристики.*

A. A. Bulgakov
Senior Lecturer
Donetsk National Technical University

THE APPLICATION OF THE SIMULATION METHOD FOR THE SOLUTION OF A NONLINEAR PROBLEM OF ELECTRIC-POWER PROCESSES TRANSFORMATION

The problem of quadratic cumulative averaging (QCA) of electric-power processes and the main stages of its simulation solution are considered. It is shown that the distribution density of the reduced cumulative process doesn't obey normal distribution law when the averaging interval is relatively short. Peculiarities of skewness, kurtosis and rated maxima (quantiles) calculations based on the ensemble of the stochastic ergodic process realizations have been considered. The simulation solution of the QCA problem has been given as θ-characteristics of the reduced cumulative process. The practice example of using the θ-characteristics for power quality evaluation has been provided.

Keywords: *electromagnetic compatibility, power quality, stochastic ergodic process, ensemble of realizations, skewness, kurtosis, θ-characteristics.*

Постановка задачи. Принцип квадратичного кумулятивного усреднения (ККУ) [1] из-за своей простоты широко используется в инженерной практике для учета инерционности электроприемников, хотя и обладает рядом недостатков [2]. Он реализован, например, в действующем стандарте на электромагнитную совместимость (ЭМС) [3], а также в ПУЭ [4] и в виде расчетного максимума получасовой нагрузки. Точное аналитическое решение задачи ККУ преобразования случайных электроэнергетических процессов на данный момент не найдено. В [5] дается решение задачи в предположении о нормальности случайного процесса после ККУ преобразования, однако такое допущение корректно не для всех случаев, ведь нормализация происходит при относительно больших интервалах усреднения. В [6] предложено имитационное решение нелинейной задачи на примере квадратичного инерционного сглаживания (КИС) случайных электроэнергетических процессов. Естественно рассмотреть решение задачи ККУ имитационным методом.

Определение числовых характеристик, функции и плотности распределения для случайной величины подробно изложено в [7], для случайных процессов в [8]. На практике обычно рассматриваются одиночные реализации случайных эргодических процессов, а имитационное решение предполагает статистическую обработку характеристик по ансамблю реализаций случайного процесса.

Преобразование ККУ. Структурная схема обобщенной модели оценивания ЭМС [9] показана на рис. 1, где $a(t)$ – входной процесс для блока. На вход обобщенной модели поступает случайный стационарный эргодический процесс $x(t)$ со средним значением x_c, среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_x, нормальным распределением ординат и заданной корреляционной функцией (КФ) $K_x(\tau)$. В [10] для случайных стационарных электроэнергетических процессов предложено использовать экспоненциальную КФ

$$K_x(\tau) = D_x \exp\{-\alpha|\tau|\} = \sigma_x^2 \exp\{-\alpha|\tau|\},$$

где параметр α – декремент затухания, обратный времени корреляции $\tau_к$. В [11] процесс изменения тока при работе дуговой сталеплавильной печи аппроксимируется экспоненциально-косинусоидальной КФ.

Преобразование ККУ реализуется с помощью квадратора (блок 1) и кумулятивного звена (блок 2), которое выполняет усреднение на заданном временном интервале θ. На выходе блока 2 протекает квадратичный кумулятивный процесс $w_\theta(t)$. В блоке 3 производится извлечение квадратного корня для получения приведенного кумулятивного процесса $x_{э\theta}(t)$.

Связь между исходным и квадратичным кумулятивным процессами описывается уравнением

$$w_\theta = \frac{1}{\theta}\int_0^t x^2 dt = L_\theta\left\{x^2\right\},$$

где L_θ – линейный оператор кумулятивного усреднения.

Приведенный кумулятивный процесс

$$x_{э\theta} = \sqrt{w_\theta}$$

удобен для практических расчетов, поскольку он имеет размерность исходного процесса.

В соответствии с принципом практической уверенности (ППУ) [12] требуется найти расчетные максимумы приведенного кумулятивного процесса $x_{э\theta M}$ – максимальные значения с заданной предельной вероятностью их превышения E_x. Расчетные максимумы определяют по интегральной функции распределения из уравнения

$$F_{xэ\theta}(x_{э\theta M}) = 1 - E_x.$$

В частных случаях детерминированных исходных процессов в виде постоянных импульсов и пауз или периодических гармонических процессов задача имеет точное аналитическое решение [1]. В случае же случайного исходного процесса возможно лишь использование приближенных методов пересчета [13].

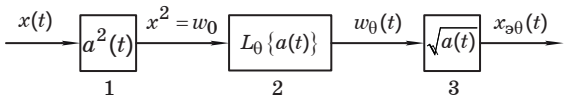


Рис. 1. Структурная схема преобразования ККУ

Основные этапы имитационного решения. В [6] изложены основные положения принципа получения имитационного решения для задачи КИС. Тот же подход применим и для ККУ преобразования. Рассмотрим основные этапы получения имитационного решения задачи ККУ.

Весь ход имитационного решения можно разделить на три основные части: получение (имитация) и оценка ансамбля исходных реализаций, их преобразование, статистическая обработка по ансамблю для получения результатов.

Имитация исходных реализаций случайного процесса с заданной КФ может быть выполнена различными методами, например [14–15]. При необходимости выполняется коррекция среднего и СКО исходных реализаций.

Для проверки распределения сымитированного ансамбля реализаций используем критерий согласия Колмогорова. Его можно применять, когда заранее известен вид распределения и его параметры, однако для случайного процесса он имеет особенность, поскольку в критерии согласия участвует величина «количество опытов»[1]. Для одиночной реализации даже большой длительности эта величина не определена, что вызывает противоречие. В самом деле, ординаты одиночной реализации стационарного случайного процесса нельзя рассматривать как отдельные опыты, поскольку последние должны быть независимыми, а ординаты имеют корреляционную связь, линейный характер которой описывает КФ процесса.

Оценку закона распределения следует производить по ансамблю реализаций процесса. Тогда в качестве количества опытов целесообразно использовать количество реализаций в рассматриваемом ансамбле. При наличии лишь одной достаточно длинной реализации случайного эргодического процесса (при имитации такой проблемы не возникает) ее целесообразно «разрезать» на несколько реализаций меньшей длительности, определяемой временем затухания КФ.

В зависимости от того, какая задача решается: КИС или ККУ, используется соответствующее преобразование исходного имитационного процесса. Приведение выполняется в случае необходимости оперирования величинами того же порядка.

Расчет числовых характеристик процесса после преобразования ККУ необходим не только

[1] В [8] предложен модифицированный критерий согласия, однако практическое его использование связано с относительно сложным интегрированием, а результат является отношением малых величин, что может давать неконтролируемую погрешность.

для отбраковки отдельных реализаций со значительными погрешностями воспроизведения этих характеристик, но также для проверки имитационного решения тестовой задачи.

Характеристики по ансамблю. Такие величины, как асимметрия Sk и эксцесс Ex, хотя и не являются конечной целью расчетов, но полезны для тестовых задач, для некоторых частных случаев которых можно найти точное решение. Определение этих характеристик по ансамблю реализаций случайного стационарного процесса имеет некоторые особенности, которые следует учитывать при выполнении практических расчетов.

При расчете асимметрии и эксцесса по ансамблю возможны два подхода. Первый заключается в определении этих характеристик по отдельным реализациям (знак ~) с последующим усреднением по ансамблю (знак ^):

$$\hat{\mathrm{Sk}} = \mathrm{M}\left\{\tilde{\mathrm{Sk}}\right\}, \quad \hat{\mathrm{Ex}} = \mathrm{M}\left\{\tilde{\mathrm{Ex}}\right\}.$$

Второй подход предполагает расчет по усредненным по ансамблю значениям СКО $\hat{\sigma}$, 3-го $\hat{\mu}_3$ и 4-го $\hat{\mu}_4$ центральных моментов.

$$\hat{Sk} = \frac{\hat{\mu}_3}{\hat{\sigma}^{1,5}} = \frac{M\{\tilde{\mu}_3\}}{M\{\tilde{\sigma}\}^{1,5}}, \quad \hat{Ex} = \frac{\hat{\mu}_4}{\hat{\sigma}^2} - 3 = \frac{M\{\tilde{\mu}_4\}}{M\{\tilde{\sigma}\}^2} - 3.$$

Реализация тестовых задач показывает, что второй подход корректнее, поскольку рассматриваемые характеристики воспроизводятся точнее.

Подобная ситуация возникает и с расчетными максимумами квадратичного процесса. При усреднении по отдельным реализациям

$$\hat{x}_{э\theta M} = M\{\tilde{x}_{э\theta M}\}$$

результат получается хуже, чем при расчете по усредненной функции распределения

$$\hat{F}_{xэ\theta}(\hat{x}_{э\theta M}) = 1 - E_x.$$

Имитационное решение. В [6] предлагается находить решение в виде зависимости инерционных максимумов от постоянной времени электроприемника. По аналогии имитационное решение задачи ККУ случайных электроэнергетических процессов будем находить в виде зависимости расчетных максимумов кумулятивных процессов от интервала усреднения θ. Эти зависимости будем называть θ-характеристиками. Они могут быть построены для исходного $x_\theta(t)$, квадратичного $w_\theta(t)$ и приведенного (эффективного) $x_{э\theta}(t)$ кумулятивных процессов, соответственно, следует различать Кθ-, ККθ- и ЭКθ-характеристики.

Имитация подтверждает, что при относительно небольших значениях интервала усреднения распределение приведенного кумулятивного процесса (рис. 2) существенно отличается от нормального распределения.

Для универсальности использования вводится система относительных единиц (символ *) с базовыми величинами σ_x и α.

У случайного процесса, подчиненного нормальному закону распределения, теоретически ординаты изменяются от $-\infty$ до $+\infty$. Реальные электроэнергетические процессы, протекающие в системах электроснабжения, обладают конечными максимальным и минимальным значениями ординат. Чтобы устранить это противоречие, при использовании рассмотренной математической модели процесса в качестве практически достоверного значения следует использовать квантиль распределения, взятый с $E_x > 0$.

Пример. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности $K_{2U}(t)$ представлен в виде случайного стационарного процесса с экспоненциальной КФ, нормальным распределением ординат и следующими характеристиками: $K_{2Uc} = 1{,}89\%$, $\sigma_{K2U} = 0{,}45\%$, $\alpha = 0{,}02\ \text{с}^{-1}$. Определить выполнение норм стандарта [3] по несимметрии напряжения.

Расчет выполним в относительных единицах $\sigma_{K2U*} = 1$ о. е., $K_{2Uc*} = K_{2Uc}/\sigma_{K2U} = 1{,}89/0{,}45 = 1{,}89/0{,}45 = 4{,}2$ о. е. Согласно [3], нормируется величина K_{2U}, усредненного на интервале времени θ = 10 мин = 600 с. Требования выполня-

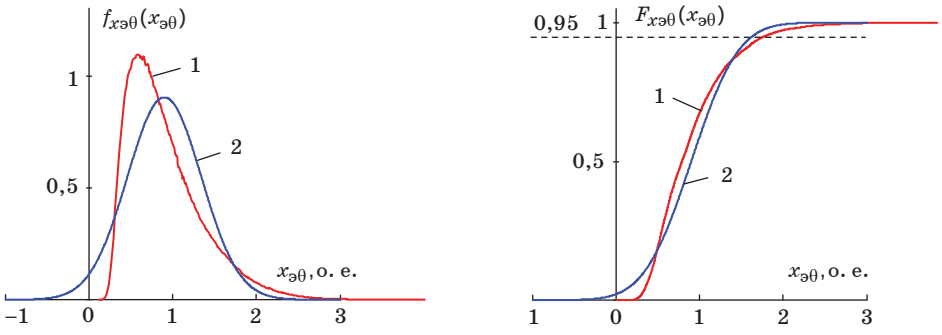


Рис. 2. Плотность и интегральная функция распределения приведенного кумулятивного процесса $x_{э\theta}(t)$: 1 – имитационная по ансамблю ($m = 200$ реализаций, $\theta_* = 1$, $x_c = 0$, $\sigma_x = 1$); 2 – нормального распределения

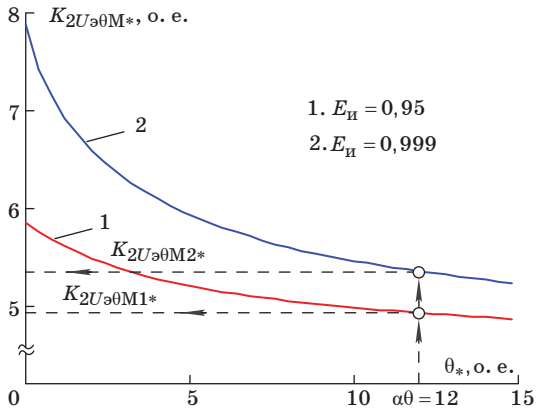


Рис. 3. θ*-характеристики приведенного кумулятивного процесса* $K_{2U\text{э}\theta*}(t)$ *(*$m = 100$ *реализаций,* $K_{2Uc*} = 4,2$ о. е.)

ются, если величина усредненного коэффициента несимметрии не превышает 2% и 4% взятого соответственно с интегральными вероятностями $E_{и1} = 95\%$ и $E_{и2} = 100\%$[1].

Для получения решения имитируем ансамбль реализаций случайного процесса. Производим преобразование ККУ и рассчитываем характеристики. По θ-характеристикам приведенного кумулятивного процесса (рис. 3), построенным для $E_{и1} = 0,95$ и $E_{и2} = 0,999$, находим значения коэффициентов ($K_{2U\text{э}\theta M1*} = 4,909$ о. е. и $K_{2U\text{э}\theta M2*} = 5,316$ о. е.), соответствующие $\theta_* = \alpha\theta = 0,02 \cdot 600 = 12$ о. е.

В именованных единицах при $E_{и1} = 0,95$:

$$K_{2U\text{э}\theta M1} = K_{2U\text{э}\theta M1*} \cdot \sigma_{K2U} = 4,909 \cdot 0,45 = 2,209\% > 2\%,$$

при $E_{и2} = 0,999$:

$$K_{2U\text{э}\theta M2} = K_{2U\text{э}\theta M2*} \cdot \sigma_{K2U} = 5,316 \cdot 0,45 = 2,39\% < 4\%.$$

Норма на коэффициент несимметрии по обратной последовательности в первом случае нарушена, требования [3] не выполняются.

Выводы. 1. Определение асимметрии и эксцесса по ансамблю следует выполнять с использованием усредненных по ансамблю моментов 3-го и 4-го порядка и СКО.

2. При определении расчетных максимумов следует использовать функцию распределения процесса по ансамблю. Расчет функции распределения по ансамблю реализаций следует проводить усреднением функций распределения отдельных реализаций.

[1] В [12] указано, что $E_{и2} = 100\%$ не соответствует ППУ, поскольку E_x не может равняться 0. В дальнейших расчетах примем $E_x = 0,001$ согласно правилу трех сигм.

Библиографический список

1. *Шидловский А. К., Куренный Э. Г.* Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. Киев: Наукова думка, 1984. 271 с.

2. Принцип оценивания и нормирования электромагнитной совместимости / Э. Г. Куренный, Е. Н. Дмитриева, А. П. Лютый и др. // Электричество. 2016. № 1. С. 12–20.

3. Гост 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.

4. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями на 1 февраля 2016 года. М.: Кнорус, 2017. 488 с.

5. *Ведерников А. С.* Метод квадратичного кумулятивного осреднения в расчетах резкопеременных графиков электрических нагрузок систем электроснабжения: автореф. дис. на соиск. учен. степ, к. т. н. Самара, 2005. 25 с.

6. *Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н., Булгаков А. А.* Статистическое решение задачи о квадратичном инерционном сглаживании случайных электрических процессов // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 4. С. 109–122.

7. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. М.: Кнорус, 2010. 664 с.

8. *Свешников А. А.* Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1986. 463 с.

9. *Кузнецов В. Г., Куренный Э. Г., Лютый А. П.* Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. Донецк: Норд пресс, 2005. 250 с.

10. Основы построения промышленных электрических сетей / Г. М. Каялов, А. Э. Каждан, И. Н. Ковалев, Э. Г. Куренный. М.: Энергия, 1978. 352 с.

11. *Салтыков А. В.* Автокорреляционные функции тока дуговой сталеплавильной печи на технологических этапах // Электротехника. 2008. № 8. С. 50–52.

12. *Дмитриева Е. Н.* Принцип практической уверенности в задачах электроэнергетики // Электричество. 2008. № 6. С. 15–21.

13. *Куренный Э. Г., Булгаков А. А.* Методы расчета эффективных максимумов параметров режима систем электроснабжения // Известия вузов. Электромеханика. 2016. № 5. С. 75–81.

14. *Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н.* Статистическое моделирование нормальных процессов в заводских электрических сетях // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1977. С. 128–140.

15. *Карташов В. Я., Новосельцева М. А.* Цифровое моделирование стационарных случайных процессов с заданной корреляционной функцией на основе метода непрерывных дробей // Управление большими системами. 2010. № 31. С. 49–91.

УДК 621.341.572

В. В. Бурлака
кандидат технических наук, доцент
Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

С. В. Гулаков
доктор технических наук, профессор
Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

КОРРЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ С ФУНКЦИЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

В статье рассмотрен оригинальный способ и система управления активным корректором коэффициента мощности (ККМ), позволяющие ограниченно интегрировать в него функцию параллельного активного фильтра высших гармоник. Это позволяет снизить коэффициент гармоник напряжения сети в точке подключения ККМ с предложенной системой управления, тем самым улучшить условия работы иного электротехнического оборудования в этой сети. Представленный способ управления применим ко всем топологиям ККМ, имеющим прямое управление входным током.

Ключевые слова: *корректор коэффициента мощности, импульсный источник питания, активный фильтр, качество электроэнергии, высшие гармоники.*

V. V. Burlaka
PhD, Tech., Associate Professor
Pryazovskyi State Technical University, Mariupol

S. V. Gulakov
Dr. Sc. Tech., Professor
Pryazovskyi State Technical University, Mariupol

POWER FACTOR CORRECTOR WITH HIGH-ORDER HARMONICS FILTERING FUNCTION

The original method and control system of the active power factor corrector (PFC), which allows to integrate the function of a parallel active filter of high-order harmonics into it, is presented in the article. This makes it possible to reduce the total harmonic distortion of the grid voltage at the point of connection of the PFC with the proposed control system, thereby improving the working conditions of other electrical equipment in this grid. The presented control method is applicable to all PFC topologies employing direct control of the input currents.

Keywords: *power factor corrector, switchmode power supply, active power filter, power quality, high-order harmonics.*

Введение современных стандартов качества электроэнергии (ГОСТ Р 51317.3.2–2006 (МЭК 61000-3-2:2005), ГОСТ Р 51317.3.4–2006 (МЭК 61000-3-4:1998), ГОСТ Р 51317.3.12–2006 (МЭК 61000-3-12:2004)) определяет интенсивное развитие схемотехники источников питания, оснащенных корректорами коэффициента мощности (ККМ). Наибольшее распространение среди однофазных систем получили ККМ на основе повышающего преобразователя (т. н. Boost-type PFC, рис. 1).

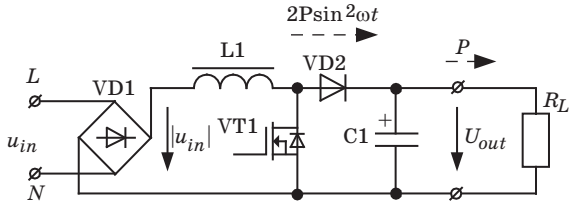


Рис. 1. Типовая схема силовой части однофазного ККМ на основе повышающего (boost) преобразователя

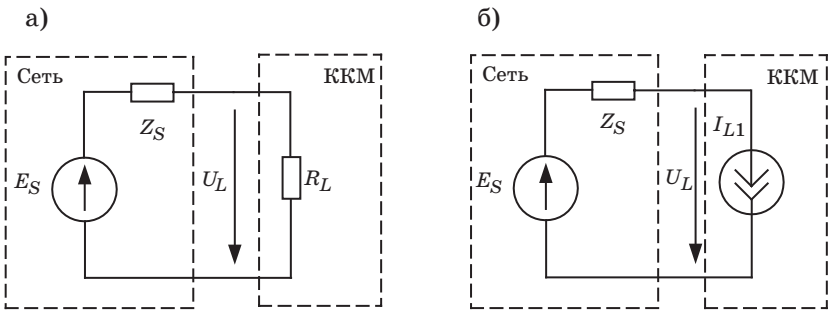


Рис. 2. ККМ, эмулирующий: а) активное сопротивление; б) источник тока первой гармоники

Подавляющее большинство таких ККМ ведут себя по отношению к питающей сети как линейное активное сопротивление (рис. 2, *а*). Существует также небольшое количество ККМ (например, на основе управляющей микросхемы Mitsubishi M81012FP) [1]), ведущих себя как источники синусоидального тока первой гармоники (рис. 2, *б*).

В обоих случаях ККМ не оказывает активного влияния на спектральный состав питающего напряжения (а в случае, показанном на рис. 2, *б*, коэффициент гармоник напряжения THD_U может увеличиться из-за снижения амплитуды основной гармоники).

Поскольку современные сети изобилуют нелинейными нагрузками, встает задача компенсации их негативного влияния.

Так, на сегодняшний день имеется большое количество электроприемников, использующих промежуточное преобразование переменного питающего напряжения в постоянное (импульсные источники питания, сварочные инверторы, преобразователи частоты и т. п.). Обычно это преобразование осуществляется путем установки диодного моста и емкостного фильтра. Потребляемый ток такой нагрузки имеет ярко выраженные нечетные гармоники, преимущественно 3-ю и 5-ю, а типовой коэффициент мощности (PF – Power Factor) лежит в диапазоне 0,5...0,7. Наличие большого количества таких электроприемников приводит к искажению формы кривой питающего напряжения, перегрузке нулевого провода, существенному ухудшению условий работы источников питания, особенно с тиристорными регуляторами, и т. п.

В достаточной степени устранить негативное влияние на сеть нелинейных нагрузок и довести параметры качества до современных требований можно с помощью активных фильтров (АФ) высших гармоник и/или оснащения электроприемников корректорами коэффициента мощности.

АФ в настоящее время строятся с применением четырехквадрантных инверторов. Это продиктовано необходимостью обеспечить двунаправленный поток мгновенной активной мощности и приводит к усложнению силовой части и системы управления ею.

Силовая часть ККМ, в свою очередь, оптимизирована для работы только при положительной мгновенной активной мощности (в 1-м и 3-м квадрантах), что делает невозможным применение для нее классических алгоритмов управления АФ.

Кроме особенностей силовой части, параллельные АФ обычно требуют установки датчиков тока компенсируемых нелинейных нагрузок. Впрочем, необходимость датчиков тока может быть устранена путем перевода инвертора параллельного АФ в режим источника напряжения, как это показано в [2].

Авторами предложен ККМ [3], система управления которого позволяет интегрировать в него функции параллельного АФ, обеспечить стабилизацию выходного напряжения ККМ, работу с положительной входной мгновенной активной мощностью и ограничение входного тока инвертора ККМ. Система управления работает в условиях отсутствия информации о токах нелинейных нагрузок, подключенных к той же сети.

Суть идеи заключается в изменении алгоритма работы схемы управления ККМ с целью снижения имитируемого входного сопротивления.

С этой целью формирование входного тока ККМ $i_L(t)$ производится в соответствии со схемой замещения, приведенной на рис. 3.

Как было сказано ранее, ККМ по отношению к сети ведет себя как активное сопротивление R_L, но имеет собственную ЭДС $e_L(t)$, содержащую

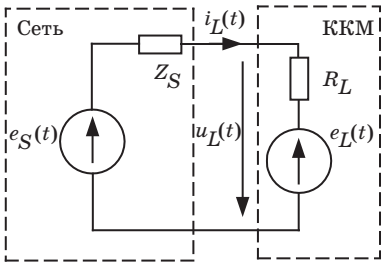


Рис. 3. Схема замещения разработанного ККМ

в своем спектре только первую гармонику частоты питающей сети.

Источник ЭДС $e_L(t)$ синхронизирован с помощью петли ФАПЧ с питающей сетью:

$$e_L(t) = E_R \sin \omega t, \quad (1)$$

где ω – круговая частота сети, $с^{-1}$;

E_R – задание на амплитуду, В.

При этом входной ток ККМ равен

$$i_L(t) = \frac{u_L(t) - e_L(t)}{R_L(E_R, P)}, \quad (2)$$

где $R_L(E_R,P)$ – имитируемое входное сопротивление ККМ, Ом.

Величина задания амплитуды E_R выбирается таким образом, чтобы мгновенная активная мощность ККМ была всегда положительной: $i_L(t) \cdot u_L(t) > 0$ (условие корректной работы инвертора ККМ, см. выше), что позволяет использовать разработанный способ управления для практически всех существующих топологий силовой части активных ККМ с прямым управлением входным током.

Величина $R_L(E_R,P)$ определяется из условия баланса мощности (необходимое условие стабилизации выходного напряжения):

$$\frac{\omega}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi/\omega} u_L(t) \frac{u_L(t) - e_L(t)}{R_L(E_R, P)} dt = P, \quad (3)$$

где P – потребляемая от сети мощность, Вт.

Цепи формирования сигналов E_R и $R_L(E_R,P)$ не должны допускать быстрых изменений этих параметров, в противном случае будет наблюдаться ухудшение качества работы системы.

По сравнению с «классическим» ККМ (рис. 2, *а*) получающаяся при той же мощности величина R_L будет меньше. Таким образом, из-за сниженного входного сопротивления ККМ будет оказывать повышенное шунтирующее действие для токов высших гармоник по аналогии с параллельным АФ.

Структурная схема системы управления, реализующей разработанный способ, приведена на рис. 4.

Опорный сигнал первой гармоники напряжения сети выделяется с помощью петли ФАПЧ (PLL, рис. 4) и вместе с заданием на амплитуду (E_R) подается на перемножитель, выход которого подключен к сумматору-вычитателю, который формирует разностный сигнал $u_L(t) - e_L(t)$. Этот сигнал подается на второй перемножитель, работающий совместно с ПИ-регулятором выходного напряжения ККМ (РН, рис. 4) и формирующий сигнал задания входного тока ККМ $i_L(t)$.

Сигнал E_R формируется цепью местной отрицательной обратной связи, содержащей звено с переключаемым в зависимости от полярности входного сигнала коэффициентом передачи и интегратор. Постоянная времени цепи ОС по E_R

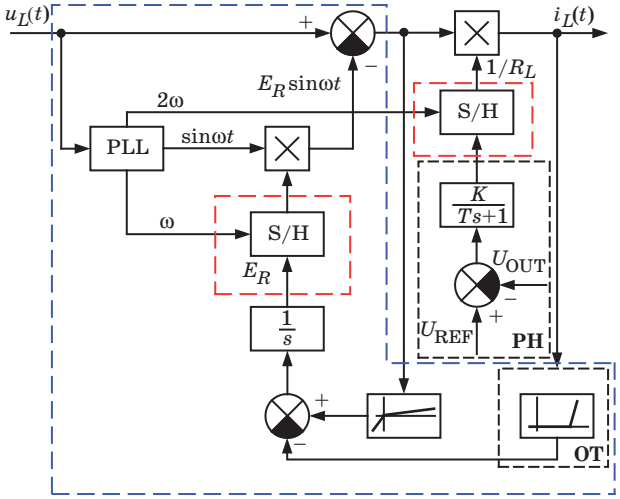


Рис. 4. Структурная схема системы управления ККМ с функцией активной фильтрации

должна значительно превышать период сетевого напряжения (т. е. E_R не должно значительно изменяться в течение периода).

Узел ограничения тока (ОТ, рис. 4) с пороговым звеном уменьшает задание на амплитуду E_R в случае недопустимого повышения входного тока. Поскольку этот ограничитель тока имеет задержку из-за интегратора E_R, быстродействующее аппаратное ограничение тока должно быть также выполнено непосредственно в схеме управления силовым ключом (или ключами).

Для повышения быстродействия регуляторов выходного напряжения U_{OUT} и задания на амплитуду E_R в цепях обратных связей установлены устройства выборки-хранения (S/H – Sample and Hold), синхронизированные с напряжением сети. Таким образом, в сигнале задания E_R подавлены все гармоники частоты сети, в результате чего он содержит только медленно меняющуюся постоянную составляющую, что и необходимо для корректной работы ККМ. Аналогично в сигнале ОС по U_{OUT} подавлены все четные гармоники частоты сети, что устраняет влияние пульсаций выходного напряжения на спектральный состав входного тока ККМ [4].

На рис. 5 приведены результаты моделирования работы разработанного авторами алгоритма

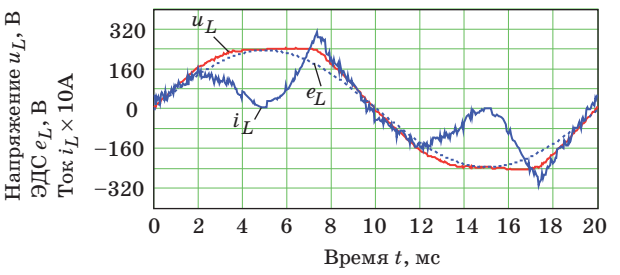


Рис. 5. Диаграмма, иллюстрирующая работу ККМ с разработанной системой управления при искаженном напряжении сети

управления ККМ в условиях искаженного напряжения сети (вторичное напряжение одной из городских подстанций; среднеквадратичное напряжение U_{RMS} = 187 В; THD_U = 9% (при этом коэффициент 3-й гармоники составляет 8,2%); потребляемая мощность ККМ P = 2 кВт при коэффициенте мощности PF_K = 0,818).

Следует отметить, что параметры качества напряжения этой подстанции не соответствуют ГОСТ 13109–97 сразу по нескольким показателям: отклонение напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициент 3-й гармонической составляющей напряжения.

В напряжении сети (u_L) выражены высшие гармоники, вызванные большим количеством нескорректированной выпрямительной нагрузки. ККМ реагирует на такое напряжение появлением высших гармоник входного тока (i_L), причем фазы этих токов противоположны фазам токов, вызвавших искажения формы кривой напряжения.

Анализ спектра показывает значительное превышение уровня высших гармоник входного тока над уровнем гармоник напряжения питания (для приведенного случая THD_U = 9,1%, THD_I = 82,5%). Это вызвано «стремлением» разработанного ККМ увеличить долю мощности, переносимой высшими гармониками. Эта доля мощности может быть определена как

$$P_k^* = 1 - \frac{U_{1m}\left(U_{1m} - E_R\right)}{2R_L \cdot P}, \qquad (4)$$

где U_{1m} – амплитуда первой гармоники напряжения сети, В.

Расчет по формуле (4) для приведенного случая показывает, что 7,9% мощности нагрузки обеспечиваются высшими гармониками напряжения. В то время как при чисто активной нагрузке ККМ (рис. 2, *а*) эта доля будет определяться как $1 - \frac{1}{1 + THD_U^2}$, что для рассматриваемого случая составляет всего 0,8%, а для случая ККМ (рис. 2, *б*) мощность, потребляемая на высших гармониках напряжения, равна нулю.

Эффект повышения доли мощности высших гармоник связан с уменьшением входного сопротивления ККМ R_L. В рассматриваемом случае разработанный ККМ работает с параметрами E_R = 235 В, R_L = 2,03 Ом. В то же время «классический» ККМ (рис. 2, *а*) имел бы в аналогичных условиях $R_L = \frac{U_{RMS}^2}{P}$, что составляет 17,48 Ом.

На рис. 6 показан пример эффекта от замены классического ККМ (рис. 2, *а*) на ККМ с описанной системой управления. Замена классического ККМ (рис. 6, *а*) на ККМ с разработанной авторами системой управления (рис. 6, *б*) приводит к повышению общего коэффициента мощности: $PF_2 > PF_1$.

Таким образом, коэффициент мощности системы «нелинейная нагрузка + разработанный ККМ» будет выше, чем у системы «нелинейная нагрузка + классический ККМ», несмотря на то что коэффициент мощности разработанного ККМ будет заметно ниже единицы. Эффект объясняется тем, что в случае, показанном на рис. 6, *б*, часть высших гармоник тока нелинейной нагрузки замыкается через ККМ, а не через питающую сеть.

В случае «чистой» сети (при незначительном уровне высших гармоник напряжения) работа разработанного ККМ полностью аналогична «классическому», т. е. в спектре входного тока будет присутствовать только первая гармоника.

Для экспериментального подтверждения теоретических результатов создан модифицированный ККМ на базе микросхемы MC33262 (рис. 7), в котором цепь обработки мгновенного напряжения сети была изменена для реализации функции активной фильтрации с возможностью ее отключения.

Обработка сигнала напряжения сети осуществлена с помощью однокристального микроконтроллера ATTiny13, формирование сигнала задания тока сети для MC33262 выполнено путем фильтрации ШИМ сигнала с контроллера с помощью разработанного авторами устройства, схема которого приведена в [5]. Внешний вид блока обработки сигнала приведен на рис. 8.

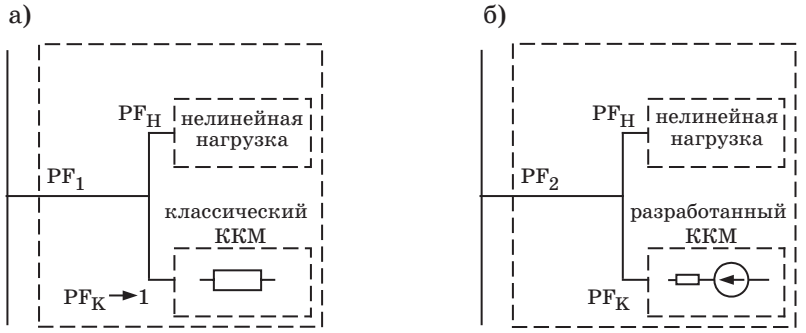


Рис. 6. Применение разработанного ККМ с нелинейной нагрузкой: $PF_2 > PF_1$

Рис. 7. Внешний вид экспериментального ККМ

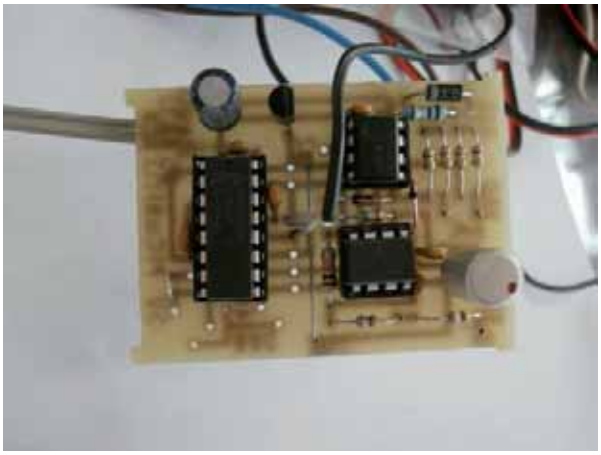


Рис. 8. Блок обработки сигнала экспериментального ККМ

Измерение параметров качества электроэнергии и осциллографирование напряжений и токов производилось с помощью разработанного авторами анализатора качества электроэнергии [6].

ККМ работал совместно с нелинейной нагрузкой, представляющей собой мостовой выпрямитель со сглаживающим конденсатором 330 мкФ, нагруженный на активное сопротивление, и потребляющей мощность 100 Вт при напряжении сети 193 В.

Мощность нагрузки ККМ составляла 140–160 Вт.

На рис. 9 и 10 приведены осциллограммы сетевого напряжения и тока при отключенной и включенной функции активной фильтрации соответственно. Для удобства представления выполнена нормировка на амплитуду.

Как видно из представленных осциллограмм, включение функции активной фильтрации в ККМ привело к повышению PF с 0,937 до 0,962; снижению THD_I с 33% до 26% и снижению THD_U с 5,8% до 5,2%, что подтверждает работоспособность описанного способа управления активным ККМ.

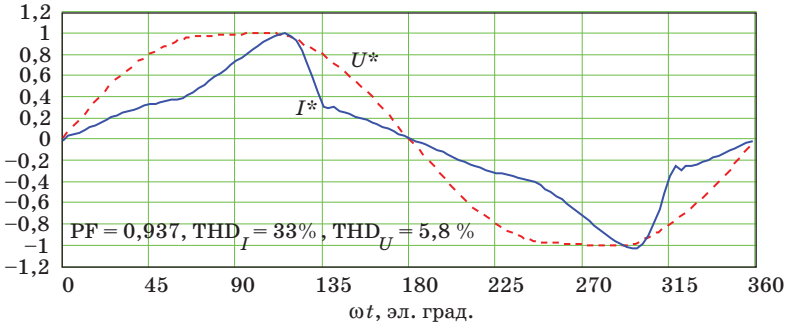


Рис. 9. ККМ имитирует активное сопротивление

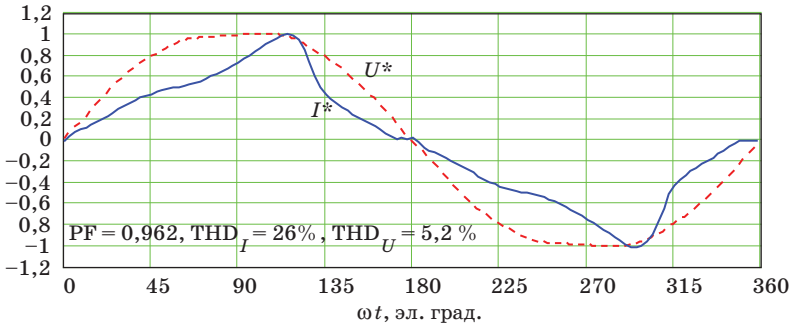


Рис. 10. ККМ в режиме активной фильтрации

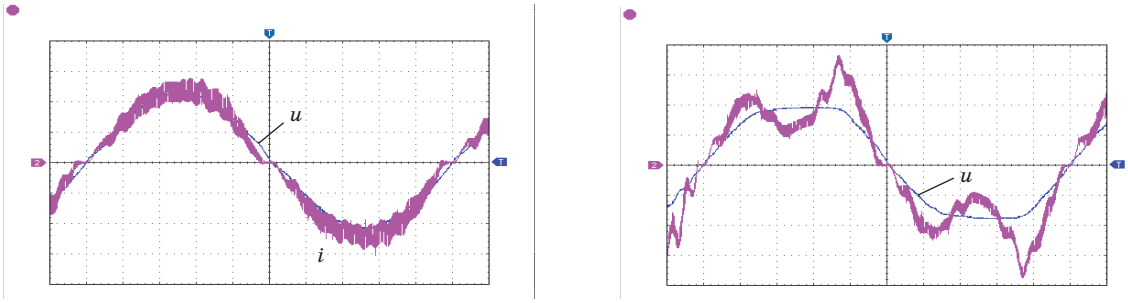


Рис. 11. Осциллограммы напряжения сети (u) и входного тока экспериментального ККМ (i):
а) в условиях «чистой» сети (THD_U менее 2%);
б) в реальной сети (THD_U порядка 6%)

На рис. 11 приведены осциллограммы напряжения сети и входного тока экспериментального ККМ при работе в условиях «чистой» сети (рис. 11, *а*), сымитированной устройством [7], и в условиях реальной сети (рис. 11, *б*). Видно хорошее совпадение с результатами моделирования (рис. 11, *б* и рис. 5).

Таким образом, разработанный авторами ККМ с описанным способом управления позволяет ограниченно интегрировать в него функции параллельного активного фильтра без датчиков тока, что позволяет улучшить спектральный состав напряжения питающей сети. Способ может быть применен для практически всех известных топологий ККМ, в которых реализовано прямое управление входным током.

Аналогичный способ и система управления могут быть применены для трехфазных активных ККМ, а также для источников питания с непосредственным преобразованием, в которых есть возможность прямого управления линейными токами. При этом следует лишь учитывать, что в случае трехпроводного подключения к трехфазной сети необходимо отфильтровывать нулевую последовательность в фазных напряжениях перед обработкой их в соответствии с описанным выше алгоритмом.

Применение источников с функциями улучшения спектра напряжения сети позволит обеспечить соблюдение требований стандартов электромагнитной совместимости технических средств, повысить качество электроэнергии и улучшить условия работы иных нагрузок, подключенных к той же сети.

Библиографический список

1. DIP-PFC Application Note: Mitsubishi Electric Corporation, Power Semiconductor Device Division. Doc. Nr. DPH 2635e. 27 p.

2. *M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa*. Current Sensorless Control of a Voltage-Source Active Power Filter – In proc. APEC'2005, 6–10 March 2005. Vol. 3. P. 1696–1702.

3. Пат. № 100449 України на винахід. МПК H02M 7/02 (2006.01) Спосіб керування активним коректором коефіцієнта потужності / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков; заявитель и патентообладатель Приазовский госуд. техн. ун-т. № а 2011 05378; заявл. 27.04.2011; опубл. 25.12.2012. Бюл. № 24. 5 с.

4. *Бурлака В. В., Гулаков С. В.* Активный корректор коэффициента мощности с повышенным быстродействием регулятора напряжения // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2010»: Матеріали 6-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф. 19–24 квітня 2010. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. 54 с.

5. Пат. України № 106021 на винахід. МПК (2014.01) H03K 9/00; H03K 7/00; H02M 1/00; H02M 3/00 Конвертор широтно-імпульсно модульованого сигналу в напругу / *В. В. Бурлака, С. В. Гулаков;* заявитель и патентообладатель Приазовский госуд. техн. ун-т. № а 2013 10745; заявл. 06.09.2013; опубл. 10.07.2014. Бюл. № 13. 4 с.

6. Лабораторный комплекс для исследования частотных характеристик цепей / *В. В. Бурлака, С. Н. Кравчук, С. В. Гулаков, В. В. Леонов* // Донбас-2020: Перспективи розвитку очима молодих вчених: матеріали VII наук.-практ. конф., 20–23 травня 2014. Донецьк: ДонНТУ, 2014. С. 76–80.

7. *Бурлака В. В., Гулаков С. В.* Источник бесперебойного питания для автономной системы электроснабжения // 15-й юбилейный Междун. молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: сб. матер. форума. Т. 1. Харьков: ХНУРЭ, 2011. С. 109–110.

УДК621.865

Л. Ю. Ворочаева
кандидат технических наук, старший преподаватель
Юго-Западный государственный университет

С. И. Савин
кандидат технических наук, старший преподаватель
Юго-Западный государственный университет

А. В. Ворочаев
аспирант
Юго-Западный государственный университет

ПОХОДКИ ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПО ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ И КРИВОЛИНЕЙНЫМ УЧАСТКАМ

В статье рассматриваются поэтапные походки внутритрубного робота, обеспечивающие его передвижение как по прямолинейным участкам трубопровода, так и по криволинейным. Конструктивно робот состоит из двух частей, соединенных между собой системой гибких тросов: одна из них, оснащенная приводами, располагается вне трубы, вторая с необходимым для мониторинга трубы оборудованием движется по трубопроводу. Описаны движения звеньев робота на каждом из этапов походки, построены поясняющие циклограммы.

Ключевые слова: *внутритрубный робот, гибкие связи, приводной модуль, внедряемый модуль, поэтапные походки, прямолинейный участок, криволинейный участок.*

L. Yu. Vorochaeva
PhD, Tech., Senior Lecturer
Southwest State University

S. I. Savin
PhD, Tech., Senior Lecturer
Southwest State University

A. V. Vorochaev
PhD Student
Southwest State University

GAITS OF IN-PIPE ROBOT WITH FLEXIBLE LINKS FOR MOVEMENT ALONG RECTILINEAR AND CURVILINEAR SECTIONS

The article discusses stage-to-stage gait of the in-pipe robot to ensure its movement in a rectilinear and curvilinear pipeline sections. Robot consists of two parts, connected by a system of flexible cables. The one part equipped with actuators located outside of the pipe, the second part with the necessary monitoring equipment pipe moves through the pipeline. The movement of the links of the robot at each stage of the gait is described, cyclogram for explaining is received.

Keywords: *in-pipe robot, flexible link, drive module, implemented module, stage of gait, rectilinear and curvilinear pipeline sections.*

Введение

Внутритрубные роботы являются объектами исследования многих ученых, что обусловлено их эффективным использованием для обследования состояния трубопроводов, обнаружения трещин и повреждений, проведения мелких ремонтных работ [1–8]. В работах [9–11] приведены классификации такого рода механизмов. Одним из наиболее интересных типов внутритрубных роботов являются роботы с гибкими связями и с изменяемой геометрией [11–16]. Изменение гео-

метрической формы звеньев робота позволяет устройству перемещаться в трубопроводах различного диаметра за счет адаптации размера к диаметру трубы. Гибкие связи обеспечивают возможность движения таких роботов как по прямым участкам труб, так и по криволинейным (преодоление поворотов). Поэтому именно такой робот рассматривается в данной статье. Особенностью предложенного устройства является тот факт, что модуль с приводами располагается вне трубы, а перемещаемый по трубопроводу модуль оснащен только необходимым для мониторинга оборудованием.

Описание конструкции устройства

В основе конструкции внутритрубного робота, принцип работы которого рассматривается в данной статье, лежит идея разделения механизма на две части (рис. 1). Одна часть – приводной модуль I – находится вне трубы, а другая часть – внедряемый модуль II – внедряется в трубопровод. Модули соединены друг с другом системой трех гибких тросов III, заключенных в гибкие оболочки. Приводной модуль содержит приводы, посредством которых тросы перемещаются относительно их оболочек. Внедряемый модуль представляет собой двухсекционный механизм, приводимый в движение гибкими тросами, перемещающимися относительно своих оболочек за счет того, что концы тросов и их оболочки соединены с некоторыми звеньями механизма внедряемого модуля.

Конструкция робота включает три троса 1–3 и их оболочки 4–6, соединяющие внедряемый и приводной модули. Последний оснащен тремя электроприводами 7–9, управляющими перемещением тросов относительно их оболочек (приводы тросов), а также тремя электроприводами 10–12, управляющими перемещением оболочек тросов относительно корпуса модуля (приводы оболочек). Каждый из приводов тросов установлен на направляющих 13–15 таким образом, чтобы его корпус мог перемещаться относительно корпуса модуля в направлении движения штока привода троса. Корпус каждого из приводов тросов соединен с оболочкой троса и штоком привода оболочки, а корпус привода оболочки соединен с корпусом модуля. Под соединением троса или оболочки троса с каким-либо звеном устройства подразумевается неподвижное соединение со звеном конца этого троса или оболочки. Приводной модуль установлен на мобильную платформу 16 с четырьмя колесами 17, синхронно приводимыми в движение одним электроприводом (на рис. 1 не показан).

Внедряемый модуль включает в себя четыре звена 18–21 (основные звенья), образующие переднюю (звенья 18 и 19) и заднюю (звенья 20 и 21) секции и попарно соединенные между собой направляющими 22, 23. К каждым двум основным звеньям 18 и 19, 20 и 21 присоединены по две трехповодковые группы 24–27, причем два поводка каждой группы присоединены к одному из основных звеньев (18 и 20), а оставшийся – ко второму (19 и 21). Все поводки имеют одинаковую длину. Взаимодействие внедряемого модуля с поверхностью трубы осуществляется контактными элементами 28–31, являющимися базисными звеньями трехповодковых групп. Присоединение трехповодковых групп производится таким образом, что при сближении двух основных звеньев передней и задней секций их контактные элементы удаляются друг от друга. Между каждой парой основных звеньев установлены упругие элементы 32–35, работающие на сжатие. Звено 18 внедряемого модуля соединено с тросом 1, звено 19 – с тросом 2 и оболочкой 4, звено 20 – с тросом 3, звено 21 – с оболочками 5 и 6.

Другие варианты конструктивного исполнения робота для перемещения по трубам рассмотрены в работе [16].

Описание принципа перемещения устройства

Данный робот может двигаться как по прямолинейным участкам трубопровода, так и преодолевать повороты, при этом будем рассматривать случай, когда у трубопровода нет ответвлений. Детально рассмотрим каждую из походок, которые являются поэтапными с фиксацией передней и (или) задней секции на каждом этапе.

Для описания движения робота введем систему координат Oxy, ориентированную таким образом, что ось Ox является осью участка трубы, по которому движется робот. Положим, что робот симметрично располагается в трубе, центры масс основных звеньев – точки C_i, $i = 1–4$ – лежат на оси Ox.

Движение по прямолинейному участку

Для описания движения робота по прямолинейному участку разобьем походку на семь этапов, на каждом из которых происходит один из типов движений: изменение формы секции (этапы 2, 3, 5, 7), движение секции вперед (этапы 1, 4) или движение приводного модуля вперед (этап 6), что детально описано ниже.

Движение в трубопроводе начинается с инициализации, которая состоит из двух этапов, начального и конечного, и заключается в расположении робота в трубе в заданном положении для осуществления этапов походки.

На начальном этапе инициализации происходит размещение внедряемой части устройства в трубе. При этом обе секции внедряемого модуля

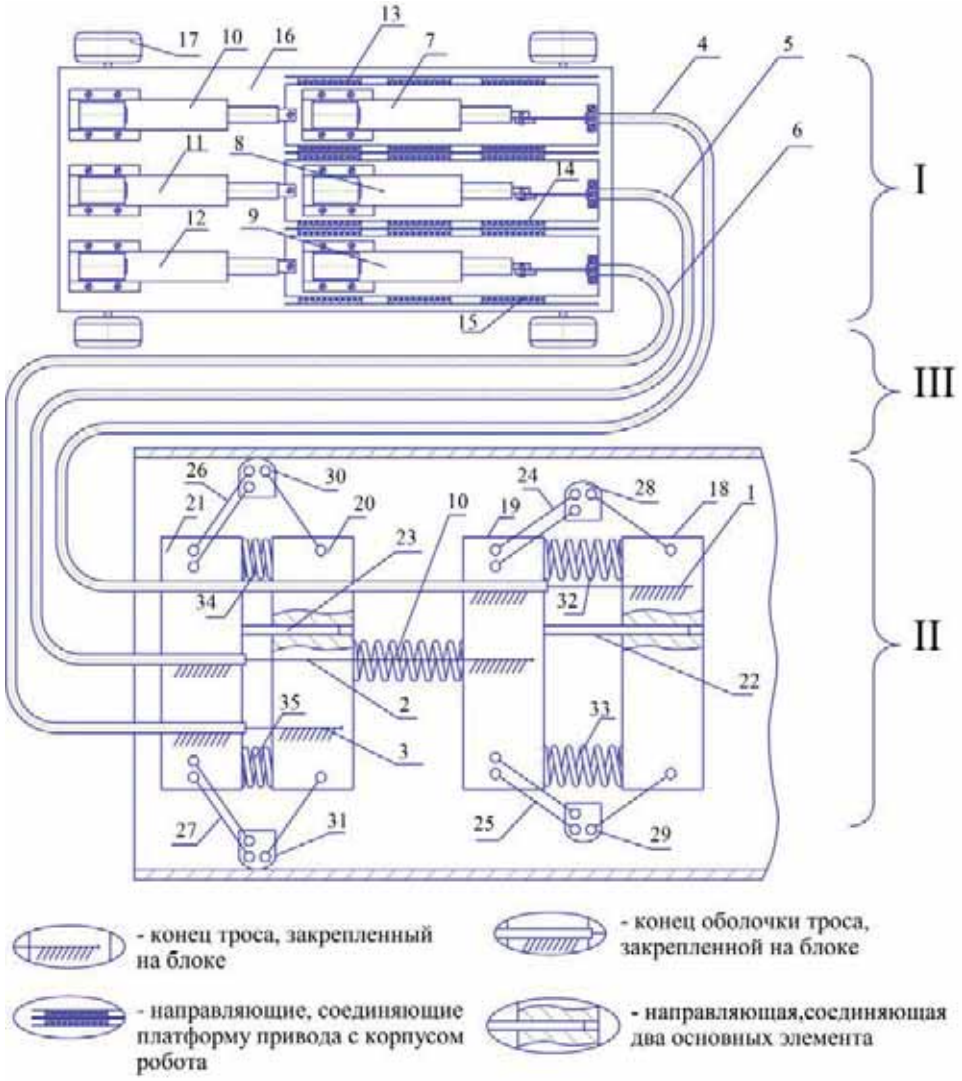


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции робота: I – приводной модуль; II – гибкие тросы; III – внедряемый модуль

в сжатом состоянии помещаются в трубу и после окончания данного этапа покоятся на внутренней поверхности трубы.

Конечный этап инициализации заключается в фиксации задней секции в трубе. Для этого приводной модуль перемещает трос 3 относительно его оболочки, заставляя звенья 20 и 21 сближаться друг с другом. При этом контактные элементы задней секции отдаляются друг от друга. Движение прекращается, когда задняя секция переходит в развернутое состояние и оказывается зафиксированной в трубе (в контактных элементах 30 и 31 появляются ненулевые нормальные реакции), что показано на рис. 2. Если этого не произошло, то можно констатировать ошибку перемещения, что не рассматривается в данной работе. Центры масс звеньев 16, 18–21 в момент начала первого этапа имеют координаты $x_{C16}{}^0$, $x_{C18}{}^0$, $x_{C19}{}^0$, $x_{C20}{}^0$, $x_{C21}{}^0$.

Перейдем к рассмотрению этапов движения робота по прямому участку трубы.

На первом этапе приводной модуль перемещает трос 2 и оболочку 4 вперед таким образом, что передняя секция движется вперед, задняя секция неподвижно располагается в трубопроводе (рис. 2, рис. 3). Расстояние между звеньями 18 и 19 остается неизменным, т. к. трос 1 движется вперед вместе со своей оболочкой.

На втором этапе приводной модуль перемещает трос 1 назад таким образом, что передняя секция переходит в развернутое состояние и оказы-

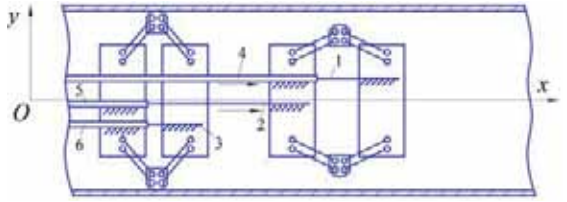


Рис. 2. Положение робота после инициализации и начальное положение первого этапа

вается зафиксированной в трубе (рис. 3, рис. 4). При этом звено 19 неподвижно, а звено 18 движется назад и подтягивается к звену 19. В момент завершения этапа обе секции взаимодействуют с поверхностью трубы, в контактных элементах 28 и 29 появляются фиксированные значения нормальных реакций.

На третьем этапе приводной модуль перемещает трос 3 вперед таким образом, что задняя секция переходит в сжатое состояние и перестает контактировать с поверхностью трубы (рис. 4, рис. 5). При этом звено 21 во время этапа остается неподвижным, а звено 20 движется вперед, удаляясь от звена 21. В момент завершения этапа контакт с трубой осуществляется только опорными элементами передней секции.

На четвертом этапе приводной модуль перемещает оболочки 5 и 6 вперед, а трос 2 назад таким образом, что задняя секция движется вперед, а передняя секция при этом остается зафиксированной в трубе (рис. 5, рис. 6). Расстояние между звеньями 20 и 21 задней секции остается неизменным, т. к. трос 3 движется вперед вместе со своей оболочкой. Трос 2 на этом этапе должен двигаться назад для того, чтобы исключить его провисание между передней и задней секциями.

На пятом этапе приводной модуль перемещает трос 3 назад таким образом, что задняя секция переходит в сжатое состояние и тоже становится зафиксированной в трубе (рис. 6, рис. 7). Во время этого этапа звено 21 задней секции неподвижно располагается в трубе, а звено 20 движется назад и подтягивается к звену 21. В контактных элементах 30 и 31 появляются фиксированные значения нормальных реакций.

На шестом этапе приводной модуль перемещает оболочки 4, 5 и 6 тросов назад таким образом, что сам приводной модуль движется вперед, секции внедряемого модуля при этом зафиксированы в трубе (рис. 7, рис. 8).

На седьмом этапе приводной модуль перемещает трос 1 вперед таким образом, что перед-

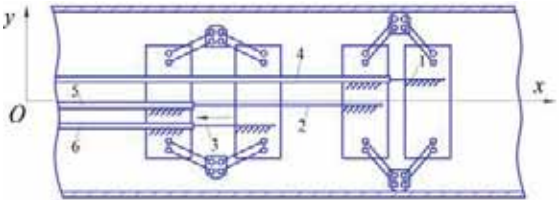


Рис. 6. Конечное положение четвертого этапа и начальное положение пятого этапа

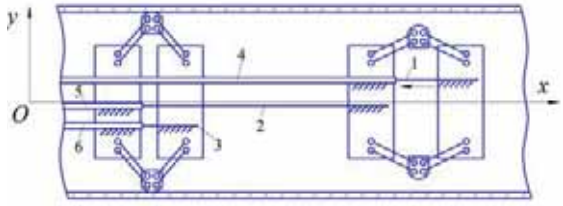


Рис. 3. Конечное положение первого этапа и начальное положение второго этапа

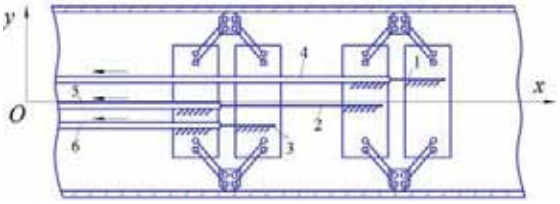


Рис. 7. Конечное положение пятого этапа и начальное положение шестого этапа

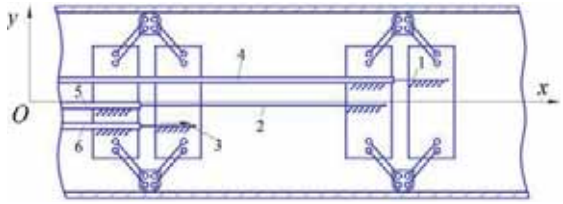


Рис. 4. Конечное положение второго этапа и начальное положение третьего этапа

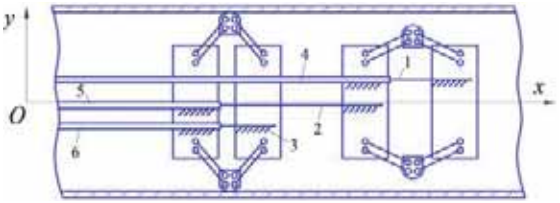


Рис. 8. Конечное положение шестого этапа и начальное положение седьмого этапа

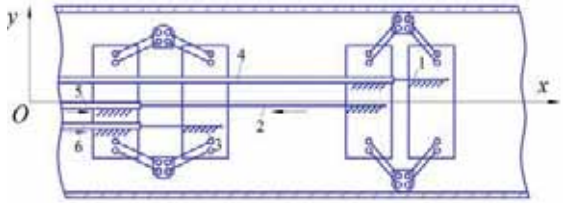


Рис. 5. Конечное положение третьего этапа и начальное положение четвертого этапа

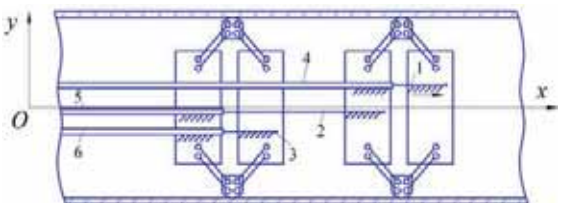


Рис. 9. Конечное положение седьмого этапа

няя секция переходит в развернутое состояние и перестает контактировать с поверхностью трубы опорными элементами, задняя секция остается зафиксированной (рис. 8, рис. 9). Во время этапа звено 19 передней секции неподвижно располагается в трубе, а звено 18 движется вперед.

После завершения цикла движения координаты центров масс звеньев становятся равными x_{C16}^{1}, x_{C18}^{1}, x_{C19}^{1}, x_{C20}^{1}, x_{C21}^{1}.

Циклограммы, наглядно иллюстрирующие работу приводов тросов и оболочек, перемещение центров масс звеньев 18–21 передней и задней секций внедряемого модуля, а также центра масс звена 16 приводного модуля, возникающие во время походки робота нормальные реакции в контактных элементах 28–31, представлены на рис. 10–12.

Принятые на рис. 11 и последующих диаграммах обозначения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условные обозначения на диаграммах

№	Обозначение	Расшифровка
1		движение секции при фиксации или расфиксации
2		движение секции вперед
3		секция неподвижна
4		перемещение секции при повороте

Движение по криволинейному участку трубы (преодоление поворота)

Движение робота по криволинейному участку можно разбить на три цикла:

1. Передняя секция движется по криволинейному участку, задняя – по прямолинейному.

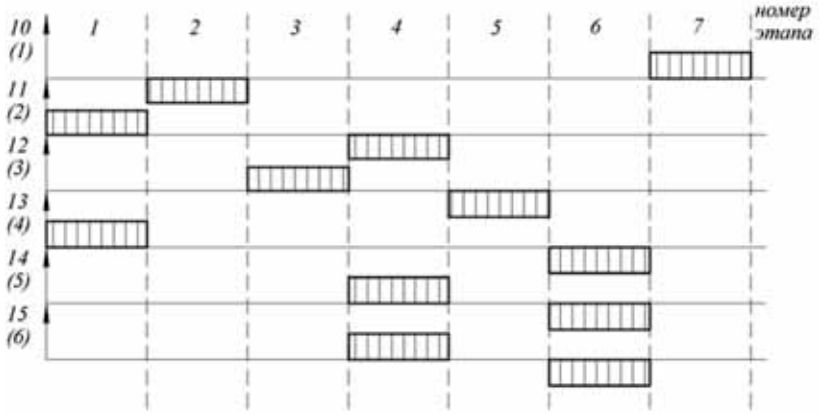


Рис. 10. Циклограмма работы приводов тросов и их оболочек

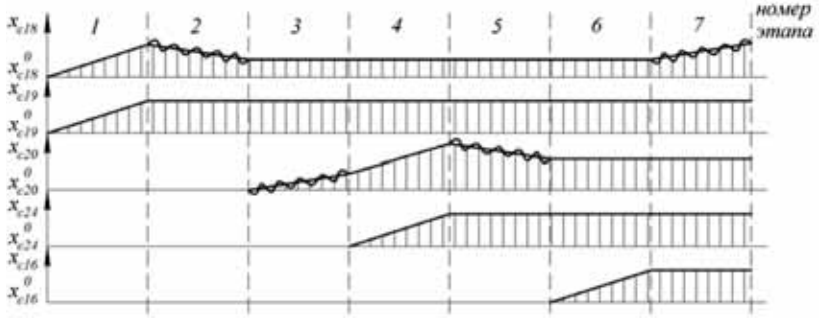


Рис. 11. Циклограмма перемещений центров масс звеньев 16, 18–21

Рис. 12. Циклограмма нормальных реакций в контактных элементах 28–31

2. И передняя, и задняя секции движутся по криволинейному участку.

3. Передняя секция движется по прямолинейному участку, а задняя – по криволинейному.

Тогда в первом случае поворот будет осуществлять только передняя секция, во втором – обе секции, в третьем – только задняя секция. Преодоление поворота также можно представить в виде поэтапной походки, в основе которой лежит походка для передвижения по прямолинейному участку трубы, в которую добавляются этапы поворота секций.

Во время первого цикла в циклограммы рис. 10–12 добавляется этап поворота передней секции между первым и вторым, общее число этапов увеличивается до восьми. Рассмотрим поворот передней секции против часовой стрелки, для этого на данном этапе приводной модуль перемещает оболочку 4 назад, а длина троса 2 остается неизменной (рис. 13). При этом передняя

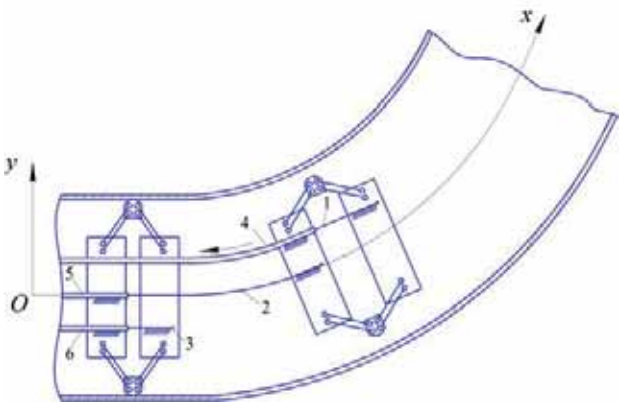


Рис. 13. Этап поворота передней секции

секция поворачивается из положения, при котором угол равен φ_{18}^{0}, до значения угла φ_{18}^{1}.

Соответствующие первому циклу циклограммы приведены на рис. 14–17.

Рис. 14. Циклограмма работы приводов тросов и их оболочек при первом цикле движения

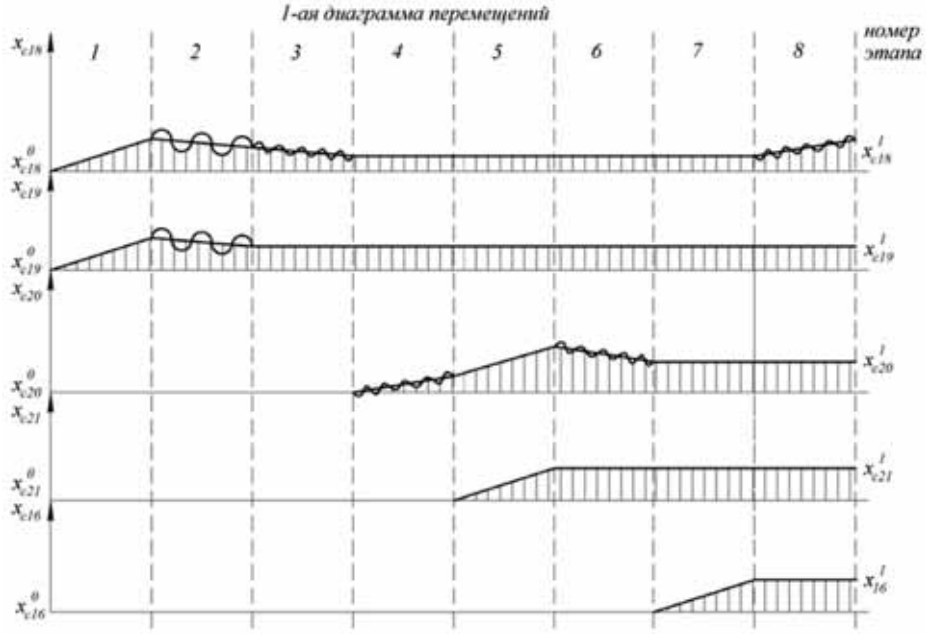


Рис. 15. Циклограмма перемещений центров масс звеньев 16, 18–21 при первом цикле движения

Рис. 16. Циклограмма углов поворота передней и задней секций при первом цикле движения

Рис. 17. Циклограмма нормальных реакций в контактных элементах 28–31 при первом цикле движения

Во время второго цикла обе секции внедряемого модуля двигаются по криволинейному участку трубы, поэтому в циклограммы рис. 10–12 добавляются два этапа, на одном из них происходит поворот передней секции от угла φ_{18}^{1} до угла φ_{18}^{2} (этот этап располагается между первым и вторым), а на другом – поворот задней секции от угла φ_{20}^{1} до угла φ_{20}^{2} (данный этап располагается между четвертым и пятым). Поворот передней секции осуществляется путем перемещения оболочки 4 назад при зафиксированной длине троса 2, а поворот задней секции за счет движения вперед оболочки 6 при неизменной длине троса 2 (рис. 18).

Соответствующие циклограммы приведены на рис. 19–22.

Третий цикл движения характеризуется движением передней секции по прямолинейному

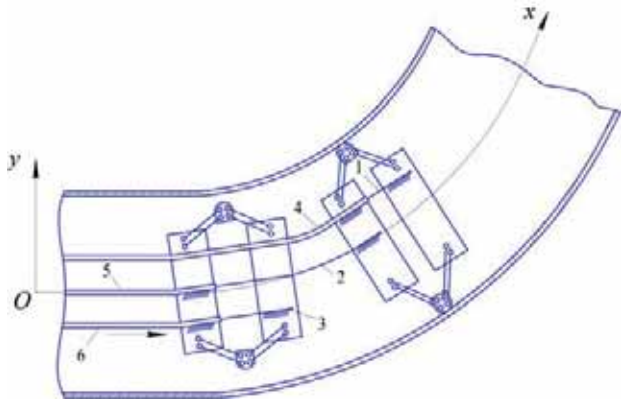


Рис. 18. Этап поворота задней секции

Рис. 19. Циклограмма работы приводов тросов и их оболочек при втором цикле движения

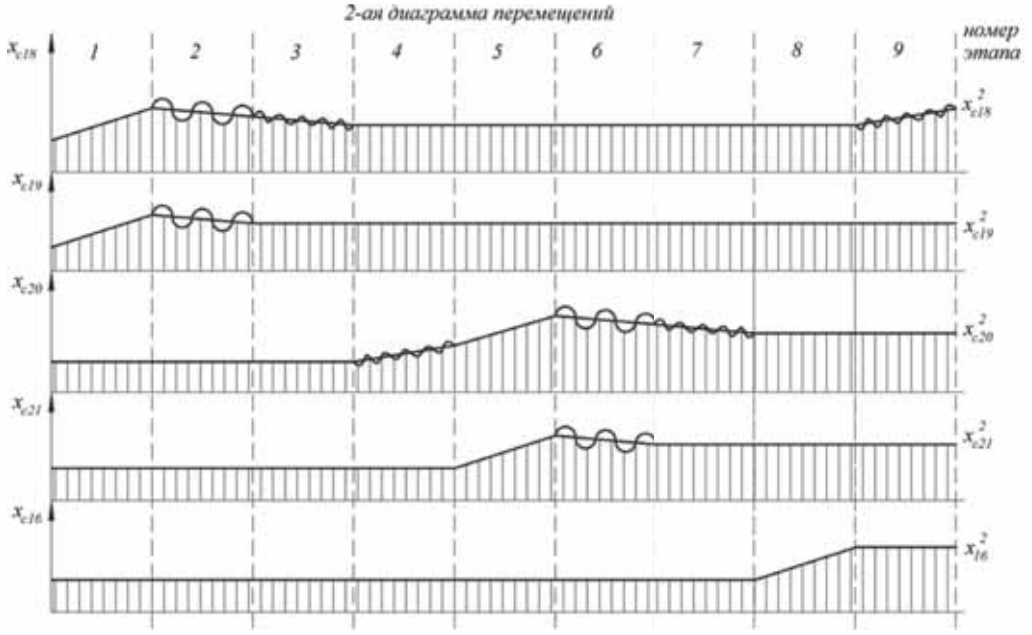


Рис. 20. Циклограмма перемещений центров масс звеньев 16, 18–21 при втором цикле движения

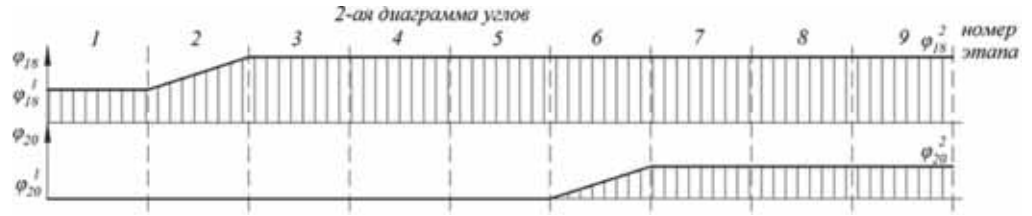


Рис. 21. Циклограмма углов поворота передней и задней секций при втором цикле движения

Рис. 22. Циклограмма нормальных реакций в контактных элементах 28–31 при втором цикле движения

Рис. 23. Циклограмма работы приводов тросов и их оболочек при третьем цикле движения

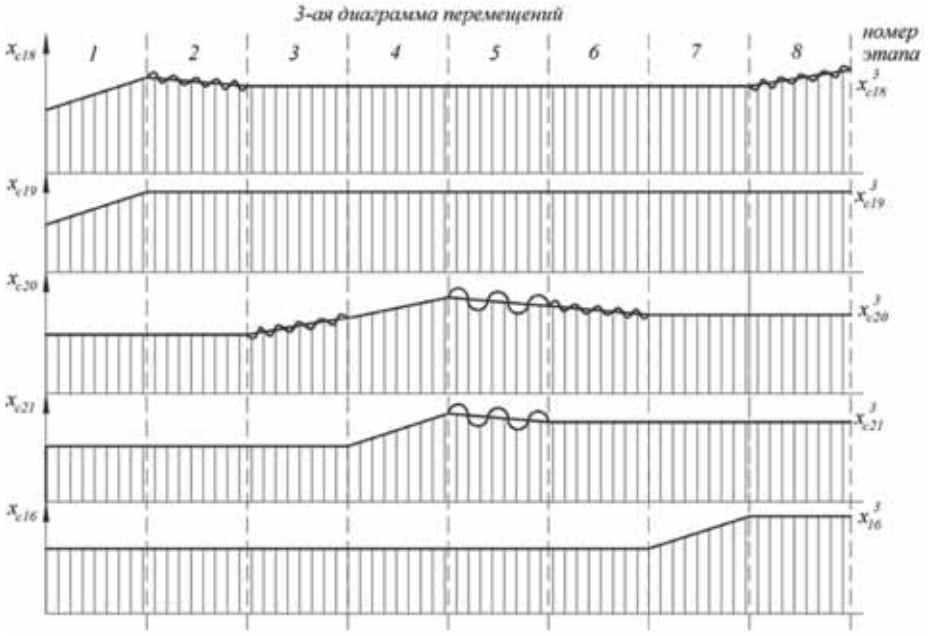


Рис. 24. Циклограмма перемещений центров масс звеньев 16, 18–21 при третьем цикле движения

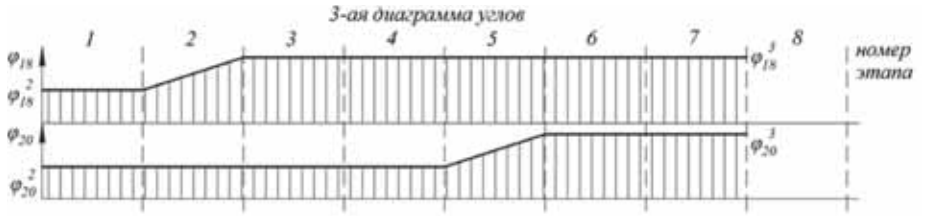


Рис. 25. Циклограмма углов поворота передней и задней секций при третьем цикле движения

Рис. 26. Циклограмма нормальных реакций в контактных элементах 28–31 при третьем цикле движения

участку трубы, а задней – по криволинейному. При этом циклограммы рис. 10–12 дополняются этапом поворота задней секции, расположенным между четвертым и пятым этапами. Поворот осуществляется за счет продвижения вперед оболочки 6 при фиксированной длине троса 2. Число этапов движения в третьем цикле становится равным восьми. Циклограммы этапов приведены на рис. 23–26.

Заключение

В статье рассматриваются поэтапные походки перемещения внутритрубного робота по прямолинейному и криволинейному участкам трубы. Конструктивно исследуемый робот состоит из двух модулей: внедряемого, который перемещается внутри трубы, и приводного, который движется вне трубы за внедряемым и несет на себе приводы, посредством которых происходит движение внедряемого модуля. Модули соединены между собой системой гибких тросов и их оболочек. Внедряемый модуль состоит из двух секций: передней и задней, также соединенных тросами и оболочками тросов.

Такая конструкция внутритрубного робота позволяет ему перемещаться как по прямолинейным, так и по криволинейным участкам труб. В обоих случаях движение является поэтапным, на каждом из этапов происходит движение вперед одной из секций внедряемого модуля, ее поворот, фиксация/расфиксация секции, движение приводного модуля. Движение

по прямолинейному участку представлено в виде последовательности семи этапов, а движение по криволинейному участку в виде последовательности трех циклов, в первом из которых поворот осуществляет передняя секция, во втором и передняя, и задняя секции, в третьем – только задняя секция, число этапов в первом и третьем циклах равно восьми, а во втором – девяти.

Исследование выполнено за счет средств гранта Президента Российской Федерации МК-2577.2017.8, договор № 14.Z56.17.2577-МК.

Библиографический список

1. *Zhang Y., Yan G.* In-Pipe Inspection Robot with Active Pipe-Diameter Adaptability and Automatic Tractive Force Adjusting // Mechanism and Machine Theory. 2007. Vol. 42. №. 12. P. 1618–1631.

2. *Jun C., Deng Z. Q., Jiang S. Y.* Study of Locomotion Control Characteristics for Six Wheels Driven In-Pipe Robot // Robotics and Biomimetics. ROBIO. IEEE International Conferenceon. IEEE. 2004. P. 119–124.

3. Development of an Adaptive Mobile Robot for In-Pipe Inspection Task / P. Li, S. Ma, B. Li, Y. Wang // Mechatronics and Automation. 2007. ICMA 2007. International Conference on. IEEE. 2007. P. 3622–3627.

4. A Review: Hybrid Locomotion of In-Pipe Inspection Robot / N. S. Roslin, A. Anuar, M. F. A. Jalal, K. S. M. Sahari // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 1456–1462.

5. Wireless Tracking and Locating System for In-Pipe Robot / H. Qi, J. Ye, X. Zhang, H. Chen // Sensors and Actuators A: Physical. 2010. Vol. 159. №. 1. P. 117–125.

6. *Kakogawa A., Ma S.* Stiffness Design of Springs for a Screw Drive In-Pipe Robot to Pass through Curved Pipes and Vertical Straight Pipes // Advanced Robotics. 2012. Vol. 26. № 3–4. P. 253–276.

7. Development of a Low Cost Small Sized In-Pipe Robot / M. R. Zin, A. M. Sahari, K. S. M. Saad etc. // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 1469–1475.

8. *Щербатов И. А.* Система управления мобильным колесным роботом для внутритрубной инспекции газопроводов // Интеллектуальные системы. 2014. (4). С. 129–140.

9. *Roh S., Choi H. R.* Differential-Drive In-Pipe Robot For Moving Inside Urban Gas Pipelines // IEEE transactions on robotics. 2005. Vol. 21. № 1. P. 1–17.

10. *Воротников С. А., Никитин Н. И., Чекарелли М.* Робототехническая система контроля и ремонта труб малого диаметра // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 2. [Электронный ресурс]. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/robototehnicheskaya-sistema-kontrolya-i-remonta-trub-malogo-diametra (дата обращения: 10.03.2017).

11. *Савин С. И.* Динамика многозвенного аппарата с гибкими упругими звеньями для перемещения по трубопроводам: дис. канд. техн. наук. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2014.

12. *S. Jatsun, A. Yatsun and S. Savin.* Pipe Inspection Parallel-Link Robot with Flexible Structure // Adaptive Mobile Robotics. Proceedings of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2012, 2012. P. 713–719.

13. *Савин С. И., Яцун С. Ф., Рублев С. Б.* Экспериментальные исследования управляемого движения робота с внешними актуаторами для мониторинга трубопроводов малого диаметра // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Издательство Самарского научного центра РАН. Самара, 2012. № 4 (5). Т. 14. С. 1277–1279.

14. *Яцун С. Ф., Савин С. И.* Экспериментальные исследования вертикального перемещения робота для мониторинга трубопроводных систем // Известия Юго-Западного госуд. ун-та. Курск, 2012. № 5 (44) Ч. 2. С. 199–202.

15. *Яцун С. Ф., Савин С. И., Тарасов О. С.* Испытательный стенд для изучения динамики робота для перемещения по трубам // Известия Юго-Западного госуд. ун-та. Курск, 2012. № 4 (43). Ч. 2. С. 221–224.

16. *Казарян К. Г., Савин С. И.* Варианты конструкции робота для перемещения по полостям // Молодежь и XXI век: матер. IV Междун. молодежной науч. конф. Курск, 2012. С. 199–202.

УДК 621.833:628.517.2

В. А. Голубков[1]
кандидат технических наук, доцент

И. Н. Лукьяненко[2]
кандидат технических наук, доцент

С. Ю. Мельников[3]
кандидат технических наук, доцент

А. Г. Федоренко[4]
кандидат технических наук, доцент

Т. Т. Шарафудинов[5]
старший преподаватель
[1,2,3,4,5]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ВЫБОР РЕЖИМОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

В статье исследованы области параметрических резонансов роторных систем в зависимости от погрешностей изготовления опор качения (шарикоподшипников) и параметров ударного воздействия. Рассмотрены вопросы выбора параметров периодических ударных воздействий при реализации ускоренных испытаний роторных систем.

Ключевые слова: *роторная система, ускоренные испытания, периодическое ударное воздействие, области неустойчивости вибрации.*

V. A. Golubkov[1]
PhD, Tech., Associate Professor

I. N. Lukyanenko[2]
PhD, Tech., Associate Professor

S. Yu. Melnikov[3]
PhD, Tech., Associate Professor

A. G. Fedorenko[4]
PhD, Tech., Associate Professor

T. T. Sharafudinov[5]
Senior Lecturer
[1,2,3,4,5]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE CHOICE OF MODES, ACCELERATED TESTING OF ROTOR SYSTEMS

In this paper the parametric resonance of rotor systems depending on manufacturing errors of the supports of the rolling elements(boll bearings) and parameters of impact. The issues concerning the selection of parameters of periodic impacts when implementing the accelerated testing of rotor systems.

Keywords: *rotary system, accelerated testing, periodic shock effect, the region of instability vibrations.*

Повышение технико-экономических показателей и надежности роторных систем (РС) является важной задачей, решать которую необходимо на всех стадиях технологического процесса производства. В значительной степени задача может быть решена путем применения эффективных методов и средств контроля технического состояния приборов и входящих в их состав

комплектующих изделий. Такой контроль дает возможность получать достоверную информацию для корректировки и стабилизации технологического процесса производства в целях повышения качества продукции. Оценить качество и надежность РС на стадии их создания позволяют ускоренные испытания.

Основная цель проведения испытаний состоит в проверке качества материалов деталей, элементов и сборочных единиц изделия; контроле точности устойчивости и надежности технологического процесса; проверке работоспособности с учетом влияния внешнего воздействия (ВВ) и проверке соответствия изделия стандартам и техническим условиям.

При разработке технологического процесса испытаний приходится одновременно удовлетворять двум противоречивым требованиям: обеспечивать высокую надежность и достоверность проверки РС и экономическую целесообразность проведения всего комплекса контрольно-испытательных работ. Решить это противоречие возможно путем оптимизации процессов испытаний [1].

Ранее уже отмечалось, что важное значение для экономии средств, идущих на испытание, и сокращения сроков освоения новой техники имеет применение ускоренных методов испытаний на надежность. Это объясняется тем, что высокие требования по надежности, предъявляемые к современным РС, приводят к тому, что доведение изделия до отказа при режимах работы, соответствующих эксплуатационным, происходит в процессе весьма длительных испытаний, гораздо больших, чем установленный для изделия ресурс. Если же необходимы также статистические данные по наработкам до отказа, то часто организация таких испытаний становится практически неосуществимой [2].

Ускоренными называются любые испытания, при которых используются те или иные методы сокращения времени испытаний. Форсированными называются ускоренные испытания, при которых ускорение достигается ужесточением (формированием) режимов с целью набора необходимого количества статистической информации за более короткий срок [3]. Самыми распространенными форсирующими факторами ускоренных испытаний являются температура и вибрация, но они не позволяют получить большого коэффициента ускорения.

Получение нужного объема информации затруднено в тех случаях, когда на испытания предъявляется единичное число образцов, созданных, например, на этапе опытно-конструкторских работ. Такие ограничения по количеству используемых изделий, а также необходимость в ряде случаев одновременного проведения с испытаниями диагностики технического состояния требуют создания новых методов испытаний, в том числе ускоренных [4, 5].

С этой точки зрения наиболее перспективными являются ускоренные испытания с применением в качестве ужесточающего режима внешних механических воздействий, которые не только способствуют выполнению главной задачи – сокращению сроков испытаний, но и дают возможность проводить активные виброакустические исследования.

К подобного рода воздействиям следует отнести в первую очередь виброударные, при которых воздействующий сигнал обладает широким спектральным составом.

Кроме того, не представляет особого труда создание виброударного воздействующего сигнала. Здесь не требуется, например, применения дорогостоящей аппаратуры, используемой при испытаниях на широкополосную вибрацию.

В настоящей работе исследуется в качестве форсирующего воздействия непрерывная последовательность ударных импульсов, подаваемых на испытываемую роторную систему и создающих в ее взаимодействующих элементах импульсные нагрузки. Такой воздействующий сигнал, как нам представляется, в значительной степени отвечает требованиям по сокращению времени испытаний (увеличению коэффициента ускорения) за счет повышения динамических нагрузок в узлах трения качения.

Существующие в настоящее время методики расчета коэффициента ускорения при испытаниях роторных систем могут применяться главным образом в случае функционирования системы вне областей неустойчивости вибрации, что обуславливает необходимость определения этих областей в зависимости от параметров внешних воздействующих факторов. Поэтому задачи изучения областей неустойчивости и выбора параметров форсирующего воздействия тесно взаимосвязаны, и их решение лежит в основе всей организации ускоренных испытаний.

Для решения этих задач необходимо исследовать динамику системы в условиях действия импульсных нагрузок и провести анализ влияния этих нагрузок на параметры, характеризующие вибрацию.

В случае испытаний РС, качество работы которых определяется динамическими характеристиками опор, динамическое подобие обеспечивается созданием определенных относительных скоростей движения этих элементов, динамических нагрузок, температурных режимов – факторами, влияющими на вибрационное состояние изделия.

Рассмотрим вибрационную модель механической системы, которая, согласно работе [6], имеет вид

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{P}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\mathbf{q} = \mathbf{F}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{M}$, $\mathbf{P}$, $\mathbf{C}$ – матрицы инерционных характеристик, демпфирования и жесткости соответственно;

$\mathbf{q}$ – вектор виброперемещений;

$\mathbf{F}$ – вектор возмущений.

Матрица инерционных характеристик в общем случае зависит от массы вибрирующих элементов, экваториального и осевого моментов инерции. Демпфирование – от сил и моментов трения, аэродинамического сопротивления, внутренних ударных сил. Особенно демпфирование проявляется в случае работы системы в областях резонанса. Жесткость определяется упругими свойствами, зависящими от нагрузки, угла контакта шариков с кольцами, числом шариков, производственными погрешностями подшипников.

В работе [6] показано, что в спектре колебаний механической системы кроме собственных частот появляются комбинационные частоты, зависящие от частоты изменения жесткости. Коэффициенты уравнения (I) становятся переменными, что оказывает влияние на резонансные свойства системы.

Наличие таких ВВ, как вибрация и удар, приводят к тому, что параметры системы также будут изменяться и за счет этих воздействий. В спектрах жесткостных параметров и возмущений помимо основных частот, вызванных производственными погрешностями, появляются комбинационные частоты, вызванные внешними воздействиями [7].

Увеличение числа спектральных составляющих неблагоприятно скажется в плане проявления дополнительных параметрических резонансов. Однако дополнительные спектральные составляющие вибрации, вызванные внешними воздействиями, расширяют возможность для диагностирования качества РС, повышают помехоустойчивость вследствие увеличения соотношения сигнала, несущего информацию о погрешностях и дефектах, и шума.

Вместе с тем наличие многих параметрических резонансов требует тщательного выбора режимов ускоренных испытаний с использованием в качества ВВ вибраций и ударов.

Воздействующий сигнал по аналогии с параметрическим усилением можно рассматривать как сигнал накачки, передающий в роторную систему, являющуюся системой колебательной, энергию, изменяющую параметры системы, в первую очередь ее жесткость. Происходит параметрическое усиление колебаний системы.

Во избежание параметрических резонансов следует создавать так называемый асинхронный режим работы, при котором синхронизм между колебаниями накачки и системы нарушается. Это обстоятельство также следует учитывать при выборе параметров ВВ.

Перейдем к определению областей неустойчивости вибрации РС. С этой целью рассмотрим уравнение пространственных перемещений ротора.

При составлении уравнений учтем, что ротор и валы установлены в подшипниках, которые являются упругими элементами, и что остальные элементы конструкции привода обладают существенно большей жесткостью, то есть считаются абсолютно жесткими. Это ротор и валы, изгибными колебаниями которых можно пренебречь, а также детали для крепления и фиксации колец подшипника, обладающие малой податливостью по сравнению с податливостью самого подшипника.

Учитывая, что перекрестные жесткости подшипников намного меньше основных, и пренебрегая угловыми колебаниями ротора и валов, а также силами демпфирования, уравнения собственных колебаний элементов РС запишутся в виде

$$M\ddot{x}_1 + \left(C_{110} + \sum_m C_{11m} \cos\omega_m t \right) x_1 = 0,$$

$$M\ddot{x}_2 + \left(C_{220} + \sum_m C_{22m} \cos\omega_m t \right) x_2 = 0, \qquad (2)$$

где

$$M = \frac{M_\text{р} M_k}{M_\text{р} + M_k};$$

M_k – масса корпуса; $M_\text{р}$ – масса ротора;

x_1 – вибрация в осевом направлении;

x_2 – вибрация в радиальном направлении;

C_{110}, C_{220} – средние значения жесткости в осевом и радиальном направлениях;

C_{11m}, C_{22m} – переменные составляющие жесткости в осевом и радиальном направлениях;

ω_m – частота изменения спектральной составляющей жесткости.

Систему уравнений (2) можно записать в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\Omega_1^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Omega_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_{11m}}{C_{110}} & 0 \\ 0 & \frac{C_{22m}}{C_{220}} \end{bmatrix} \cos\omega_m t \right\} \times \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0, \qquad (3)$$

где $\Omega_1 = \sqrt{\frac{c_{110}}{M}}$; $\Omega_2 = \sqrt{\frac{c_{220}}{M}}$ – собственные частоты РС.

В работе [8] показано, что границы областей неустойчивости следует находить из уравнения:

$$\begin{bmatrix} 1 \mp \frac{C_{11m}}{2C_{110}} - \frac{\theta_1^2}{4\Omega_1^2} & 0 \\ 0 & 1 \mp \frac{C_{22m}}{2C_{220}} - \frac{\theta_2^2}{4\Omega_2^2} \end{bmatrix} = 0, \qquad (4)$$

где θ_1, θ_1 – частоты, определяющие границы неустойчивости вибрации.

Уравнение (4) распадается на два независимых уравнения:

$$1 \mp \frac{C_{11m}}{2C_{110}} - \frac{\theta_1^2}{4\Omega_1^2} = 0,$$

$$1 \mp \frac{C_{22m}}{2C_{220}} - \frac{\theta_2^2}{4\Omega_2^2} = 0. \qquad (5)$$

Эти уравнения дают возможность получить аналитические выражения для расчета границ областей неустойчивости:

$$\theta_1 = 2\Omega_1 \sqrt{1 \mp \frac{C_{11m}}{2C_{110}}},$$

$$\theta_2 = 2\Omega_2 \sqrt{1 \mp \frac{C_{22m}}{2C_{220}}}. \qquad (6)$$

Из формулы (6) видно, что для определения границ областей неустойчивости необходимо знать собственные частоты РС в осевом и радиальном направлениях, а также величины переменных и средних значений жесткостей.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости спектральных составляющих жесткостей в осевом и радиальном направлениях соответственно от значений производственных погрешностей подшипниковых опор r_{qk} и параметра ударного воздействия $\frac{\tau_{уд}}{T}$, где $\tau_{уд}$ – длительность ударного импульса, T – период повторения, а $C_{\omega_{уд}}, C_{2\omega_{уд}}, C_{z\omega_q}, C_{\omega_{уд} \pm z\omega_q}$ – спектральные составляющие жесткостей вибрации на соответствующих частотах.

Указанные зависимости были рассчитаны и построены для РС с массой 0,06 кг, массой ротора 0,025 кг при условии, что ротор опирается на два радиально-упругих подшипника 207683 с осевой нагрузкой 1,5 Н на основании уже имеющихся в работе [8] графиков, отражающих связь между переменными составляющими осевой и радиальной жесткостей и нагрузкой, пригодных для любого типа подшипника с шестью шариками и начальным углом контакта $\alpha = 12^\circ$.

На рис. 3, 4 изображены диаграммы областей неустойчивости осевой и радиальной вибрации РС в зависимости от частоты ударного воздействия, частоты вращения ротора и производственных погрешностей опор качения при значении параметра $\frac{\tau_{уд}}{T} = 0{,}1$.

Анализ диаграммы позволяет сделать вывод, что области неустойчивости вибрации РС с увеличением производственных погрешностей опор качения несколько расширяются и сдвигаются в сторону низких частот ударного воздействия. Это объясняется снижением собственных частот и увеличением переменных составляющих жесткости системы с возрастанием производственных погрешностей.

Кроме того, области неустойчивости, возникающие от ударного воздействия, шире областей, возникающих за счет флуктуации жесткости от погрешностей опор качения, а число областей неустойчивости от ударного воздействия значительно больше, чем от погрешностей опор качения.

При реализации ускоренных испытаний с использованием периодического ударного воздействия необходимо выбирать его параметры таким образом, чтобы избежать попадание рабочих режимов РС в области неустойчивости. При этом ускоренные испытания форсируют износ элементов с определенным коэффициентом ускорения, не нарушая физику процессов, возникающих в зонах трения.

Библиографический список

1. *Гаврилов А. Н.* Технология авиационного приборостроения: учебник для авиационных вузов. М.: Машиностроение, 2012. 480 с.

2. *Проников А. С.* Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

3. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

4. Вибродиагностика механических систем в процессе ускоренных испытаний // Динамика и вибродиагностика механических систем: межвуз. сб. науч. тр. / Ивановский политехн. ин-т. Иваново, 1986. С. 43–48.

5. *Явленский А. К., Кулаков А. В., Фарафонова Т. В.* Ускоренные испытания электромеханических устройств приборов с помощью воздействий // Пути интенсификации производства в приборостроении на базе ресурсо- и энергосберегающих технологий: тез. докл. всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1986. С. 211–212.

6. *Явленский А. К., Явленский К. Н.* Теория динамики и диагностики систем трения качения. Л.: ЛГУ, 1978. 184 с.

7. *Голубков В. А., Кулаков А. В.* Надежность роторных устройств приборов в условиях внешней вибрации. Лен. ин-т авиац. приборостр. Л.: 1985. 5 с.

8. *Голубков В. А.* Разработка методов расчета вибрации и диагностики роторных систем при их неравномерном вращении: дисс. канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1983. 217 с.

УДК 621.833:628.517.2

В. А. Голубков[1]
кандидат технических наук, доцент

В. Ф. Шишлаков[2]
доктор технических наук, профессор

А. Г. Федоренко[3]
кандидат технических наук, доцент

Т. Т. Шарафудинов[4]
старший преподаватель
[1,2,3,4]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЗДЕСТВИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ЖЕСТКОСТИ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

В статье исследованы спектральные характеристики жесткости роторной системы в условиях периодического ударного воздействия с учетом анализа деформаций, возникающих в зонах контакта тел опор качения.

Ключевые слова: *роторная система, жесткость, периодическое ударное воздействие, деформация.*

V. A. Golubkov[1]
PhD, Tech., Associate Professor

V. F. Shishlakov[2]
Dr. Sc., Tech., Professor

A. G. Fedorenko[3]
PhD, Tech., Associate Professor

T. T. Sharafudinov[4]
Senior Lecturer
[1,2,3,4]*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE IMPACT OF PERIODIC SHOCKS TO THE PARAMETERS OF STIFFNESS OF ROTOR SYSTEMS

The article investigates the spectral characteristics of the stiffness of the rotor system in the periodic impact analyses of the deformations in the contact area of the rolling bodies of the supports.

Keywords: *rotary system, stiffness, periodic impact, deformation.*

Параметры жесткости роторных систем (РС) играют большое значение при идентификации модели вибрации. Параметры жесткости также влияют на зоны параметрического резонанса РС и, соответственно, на выбор режимов ускоренных ресурсных испытаний. Вибрационная модель РС позволяет на стадии проектирования оценивать динамические нагрузки, возникающие в зонах контакта опор качения. Особый интерес представляет задача построения вибрационной модели в условиях периодического ударного воздействия, которая позволяет моделировать ускоренные испытания РС и оценивать их ресурс работы.

Существуют четыре типа динамических моделей, пригодных для решения поставленной задачи во временной области: модели с распределенными параметрами, модели с сосредоточенными параметрами, смешанные модели, конечно-разностные модели. Наибольшее распространение при рассмотрении поведения механических и

электромеханических систем в условиях ударных воздействий получили динамические модели с сосредоточенными параметрами, практические расчеты по которым всегда ограничены конечным числом учитываемых членов (то есть степеней свободы) [1]. Кроме того, такие модели наиболее удобны при рассмотрении теоретических основ проведения механических испытаний указанных систем [2]. Поэтому для теоретических исследований в настоящей работе была выбрана модель с сосредоточенными параметрами, имеющая конечное число степеней свободы и описываемая системой линейных уравнений.

В связи с тем, что внешние ударные воздействия служат только для заданного импульсного изменения таких параметров, как жесткость и возмущающие силы, опущено рассмотрение динамики ударных процессов, происходящих при соударении подвижных элементов РС.

Сделано также допущение о том, что ударный импульс, воздействующий на эти элементы, близок к косинусоидальной форме.

Важным этапом при исследовании динамических процессов роторных систем в условиях ударных воздействий является анализ деформаций, возникающих в местах контакта тел качения шарикоподшипника. Это объясняется тем, что величина и характер изменения деформаций, имеющих место в зоне контакта шариков с кольцами, в значительной степени определяют жесткостную характеристику системы и сил, влияющих на вибрационное состояние.

Рассмотрим динамические перемещения кольца шарикоподшипника. Систему уравнений движения внутреннего кольца без учета сил демпфирования в условиях ударных воздействий можно записать в виде [3]

$$M\ddot{X}j + \sum_{i=1}^{z} F_{\text{упр}ji} = F_{\text{ст}j} + F_{\text{уд}j}, \qquad (1)$$

где M – масса внутреннего кольца подшипника;

Xj – координата, определяющая положение центра масс внутреннего кольца в j-м направлении ($j = 1$ – осевое, $j = 2, 3$ – радиальное);

$F_{\text{ст}j}$ – проекция статической нагрузки на j-е направление;

$F_{\text{упр}ji}$ – проекция силы упругости, действующая в контакте внутреннего кольца с i-м шариком на j-е направление;

z – число шариков.

В соответствии с теорией Герца – Беляева силу упругости, действующую со стороны i-го шарика на j-е кольцо, можно представить в виде [4]

$$F_{\text{упр}ji} = K_q \delta_{qi}^{3/2} e\left(\delta_{qi}\right),$$

где δ_{qi} – деформация i-го шарика в контакте с q-м кольцом;

K_q – конструктивный параметр, зависящий от геометрических размеров и физико-математических свойств материала колец;

$$e\left(\delta_{qi}\right) = \begin{cases} 1, \delta_{qi} \rangle 0 \\ 0, \delta_{qi} \le 0 \end{cases}$$ – функция контактирования.

В работах [4] показано, что полная деформация в контакте i-го шарика с внутренним кольцом подшипника с учетом осевых нагрузок определяется статической $\delta_{\text{ст}}$ и динамической составляющими, обусловленными действием статической и динамической нагрузок (последняя возникает вследствие вибрации). Деформация имеет вид

$$\delta_{2i} = \delta_{2\text{ст}i} + \frac{K_1^{2/3}}{K_1^{2/3} + K_2^{2/3}} \times$$
$$\times\left(x_1 \sin\alpha i + x_2 \cos\alpha i \cos\psi_{1i} + \right.$$
$$\left. + x_3 \cos\alpha i \sin\psi_{1i} - \delta r_{1i} + \delta r_{2i} + \delta d_i\right),$$

где α_i – угол контакта i-го шарика с внутренним кольцом;

$\psi_{1i} = \psi_1 + \frac{2\pi}{z}(i-1)$ – угловое положение i-го шарика относительно неподвижного кольца в плоскости вращения;

$\delta r_{1i}, \delta r_{2i}, \delta d_i$ – составляющие деформации, характеризующие производственные погрешности, не учтенные при статических расчетах.

В условиях полного контактирования, которые характерны для рассматриваемых роторных систем, нелинейную функцию степени «3/2» линеаризуем производной обобщенной функции.

В работах [4] показано, что полная деформация в контакте i-го шарика с внутренним кольцом подшипника с учетом нагрузок определяется статической $\delta_{\text{ст}}$ и динамической составляющими, обусловленными действием статической и динамической нагрузок (последняя возникает вследствие вибрации). Деформация имеет вид

$$\delta_{2i} = \delta_{2\text{ст}i} + \frac{K_1^{\frac{2}{3}}}{K_1^{2/3} + K_2^{2/3}} \times$$
$$\times\left(X_1 \sin\alpha_i + X_2 \cos\alpha_i \cos\Psi_{1i} + \right.$$
$$\left. + X_3 \cos\alpha_i \sin\Psi_{1i} - \delta_{r_{1i}} + \delta_{r_{2i}} + \delta_{d_i}\right),$$

где α_i – угол контакта i-го шарика с внутренним кольцом;

$\Psi_{1i} = \Psi_1 + \frac{2\pi}{z}(i-1)$ – угловое положение i-го шарика относительно неподвижного кольца в плоскости вращения;

$\delta_{r_{1i}}$, $\delta_{r_{2i}}$, δ_{d_i} – составляющие деформации, характеризующие производственные погрешности, не учтенные при статических расчетах.

В условиях полного контактирования, которые характерны для рассматриваемых роторных систем, нелинейную функцию степени «1/2» ли-

неаризуем производной обобщенной функции $\left(\delta_{2i}^{3/2}\right)e(\delta_{2i})$.

$$\left(\delta_{2i}^{3/2}\right)e(\delta_{2i})=\left[\delta_{2\text{ст}i}^{3/2}+\frac{K_1^{\frac{2}{3}}}{K_1^{2/3}+K_2^{2/3}}(\delta_{2\text{ст}i})^{1/2}\times\right.$$
$$\times\left(X_1\sin\alpha_i+X_2\cos\alpha_i*\cos\Psi_{1i}+\right.$$
$$\left.\left.+X_3\cos\alpha_i\sin\Psi_{1i}-\delta_{r_{1i}}+\delta_{r_{2i}}+\delta_{d_i}\right)\right]e(\delta_{2i}). \quad (2)$$

Учитывая, что характер контактирования шариков с кольцами в условиях динамики соответствует контактированию в статике [4], можно записать, что $e(\delta_{2i})\approx e(\delta_{2\text{ст}i})$.

Анализ системы уравнения (1) с учетом (2) позволяет формулировать условия статического равновесия

$$K_2\sum_{i=1}^{z}\delta_{2\text{ст}i}^{3/2}e(\delta_{2\text{ст}i})\varepsilon_i=F_{\text{ст}i}+F_{\text{уд}i}, \quad (3)$$

где

$$\varepsilon_i=\begin{cases}\sin\alpha_i\\ \cos\alpha_i\cos\Psi_{1i}\ \text{при}\ i=2,\\ \cos\alpha_i\sin\Psi_{1i}\ \text{при}\ i=3.\end{cases}$$

Деформацию $\delta_{2\text{ст}i}$ будем определять из уравнения (3).

В первом приближении при учете равенства углов контакта шарика с обоими кольцами полная деформация i-го шарика имеет вид

$$\delta_{\text{ст}i}=\frac{K_1^{2/3}+K_2^{2/3}}{K_1^{2/3}}\delta_{2\text{ст}i.}$$

При наличии производственных погрешностей на телах качения в ударных нагрузках деформации шариков перераспределяются, также изменяются их углы контакта. Поскольку система (3) имеет ($2z$+2) неизвестных, то эти параметры находятся в виде

$$\delta_{\text{ст}i}=\delta+\sum_{q=1}^{z}\delta_q k\cos\left[k\Psi_q+k\frac{2\pi}{z}(i-1)+\varphi_q\right]+$$
$$+\delta_m^c\cos\left[\Psi_1+\frac{2\pi}{z}(i-1)\right]+\delta_m^s\sin\left[\Psi_1+\frac{2\pi}{z}(i-1)\right]; \quad (4)$$

$$\alpha_i=\alpha\sum_{q=1}^{z}\alpha\delta_q k\cos\left[k\Psi_q+k\frac{2\pi}{z}(i-1)+\varphi_q\right]+$$
$$+\delta_m^c\cos\left[\Psi_1+\frac{2\pi}{z}(i-1)\right]+\delta_m^s\sin\left[\Psi_1+\frac{2\pi}{z}(i-1)\right], \quad (5)$$

где $\Psi_q=K_q\Psi_{\text{в}}(t)$, K_q зависит от геометрических размеров подшипника и угла α_0;

φ_q – фазовый угол, определяющий положение q-го кольца;

α_0 – начальный угол контакта до приложения нагрузки и без учета производственных погрешностей;

$\Psi_1=\omega_1 t$ (ω_1 – угловая скорость вращения сепаратора) и

$\Psi_{\text{в}}=\omega_{\text{в}}t$ ($\omega_{\text{в}}$ – угловая скорость вращения внутреннего кольца) – углы, определяющие положение сепаратора и внутреннего кольца;

δ_m^c, δ_m^s, α_m^c, α_m^s – косинусные и синусные составляющие переменной составляющей деформации и угла контакта.

В случае периодически действующей импульсной нагрузки

$F_{\text{уд}}=\sum_{n=1}^{k}F_{\text{уд}n}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}}+\varphi_n\right)$, где $\Psi_{\text{уд}}$ – частота следования ударных импульсов, а n – номер гармоники разложения в ряд Фурье последовательности ударных импульсов, и с учетом дискретности поддерживающей структуры подшипника параметры, δ,δ_m^c и δ_m^s будут периодическими функциями [4].

С целью упрощения записи системы уравнений, необходимых для расчета деформации, введем следующие переобозначения:

$$\delta=\delta_1;\ \ \delta_m^{1c}=\delta^2;\ \ \delta_m^{1s}=\delta^3;\ \ \delta_{n1}^{1c}=\delta_{n1}^2;\ \ \delta_{n1}^{1s}=\delta_{n1}^3;$$
$$\delta_{n2}^c=\delta_{n2}^2;\ \ \delta_{n2}^s=\delta_{n2}^3;\ \ \delta_{n3}^s=\delta_{n3}^3;\ \ \delta_{n3}^c=\delta_{n3}^2;$$
$$\delta_m^c=\delta_2;\ \ \delta_m^s=\delta_3;$$
$$\alpha=\alpha_1;\ \ \alpha_m^c=\alpha_2;\ \ \alpha_m^s=\alpha_3.$$

Тогда параметры, входящие в (4), находятся из выражения

$$\delta_{1(2,3)}=\delta^{1(2,3)}+\sum_{n=1}^{k}\delta_n^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}}+\varphi_n^{1(2,3)}\right)+$$
$$+\left[\sum_{n=0}^{k}\delta_{n1}^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}}+\varphi_{n1}^{1(2,3)}\right)\right].$$
$$\cos z\left[\Psi_1+\frac{2\pi}{z}(i-1)+\varphi_{n1}^{1(2,3)}\right]+$$
$$+\left[\sum_{n=0}^{k}\delta_{n2}^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}}+\varphi_{n2}^{1(2,3)}\right)\right].$$
$$\cos z\left[\Psi_{\text{в}}+\frac{2\pi}{z}(i-1)+\varphi_{n2}^{1(2,3)}\right]+$$
$$+\left[\sum_{n=0}^{k}\delta_{n3}^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}}+\varphi_{n3}^{1(2,3)}\right)\right].$$
$$\cos z\left[\Psi_2+\frac{2\pi}{z}(i-1)+\varphi_{n3}^{1(2,3)}\right], \quad (6)$$

где $\delta_{n1}^{1(2,3)}$ – составляющие деформации, обусловленные погрешностями нагруженного коль-

ца с учетом периодических импульсных воздействий;

$\delta_{n2}^{1(2,3)}$, $\delta_{n3}^{1(2,3)}$ – составляющие деформации, обусловленные погрешностями внутреннего кольца с учетом периодических импульсных воздействий;

$\delta_{n}^{1(2,3)}$ – деформации, обусловленные только периодическими импульсными воздействиями.

Учитывая взаимосвязь параметров деформации и углов контакта [4]:

$$\alpha_2 = -\left[\delta^2 / (h+\delta)\cos\alpha_0\right]\times$$

$$\times\left\{1-[(h\cos\alpha_0)/(n+\delta)]^2\right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$\alpha_3 = -\left[\delta^3 / (h+\delta)\cos\alpha_0\right]\times$$

$$\times\left\{1-[(h\cos\alpha_0)/(n+\delta)]^2\right\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (7)$$

можно сделать вывод о том, что параметры угла контакта $\alpha_{1(2,3)}$ являются также периодическими функциями. Тогда искомые параметры, входящие в (5), определяются как

$$\alpha_{1(2,3)} = \alpha^{1(2,3)} + \sum_{n=0}^{k}\alpha_n^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}} + \varphi_n^{1(2,3)}\right) +$$

$$+\left[\sum_{n=0}^{k}\alpha_{n1}^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}} + \varphi_{n1}^{1(2,3)}\right)\right]\cdot$$

$$\cos z\left[\Psi_1 + \frac{2\pi}{z}(i-1) + \varphi_{n1}^{1(2,3)}\right] +$$

$$+\left[\sum_{n=0}^{k}\alpha_{n2}^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}} + \varphi_{n2}^{1(2,3)}\right)\right]$$

$$\cos z\left[\Psi_{\text{в}} + \frac{2\pi}{z}(i-1) + \varphi_{n2}^{1(2,3)}\right] +$$

$$+\left[\sum_{n=0}^{k}\alpha_{n3}^{1(2,3)}\cos\left(n\Psi_{\text{уд}} + \varphi_{n3}^{1(2,3)}\right)\right]$$

$$\cos z\left[\Psi_2 + \frac{2\pi}{z}(i-1) + \varphi_{n3}^{1(2,3)}\right]. \qquad (8)$$

Для определения параметров деформации (6), обусловленных погрешностями элементов подшипника и ударными воздействиями, необходимо решить уравнения статики (3) относительно δ, δ_m^c, δ_m^s для $(4K+4)$ угловых положений сепаратора, которые с учетом (7) примут вид

$$\frac{K_1K_2}{\left(K_1^{2/3}+K_2^{2/3}\right)^{3/2}}\sum_{i=1}^{z}(\delta_{\text{ст}i})^{\frac{3}{2}}\left(1-\left(\frac{h\cos\alpha_0}{h+\delta}\right)^2\right)^{1/2}\times$$

$$\times\left\{1-\frac{h[\delta_m^c\cos\psi_{i1}+\delta_m^s\sin\psi_{i1}}{(h+\delta)^2}\right\}e(\delta_{\text{ст}i}) = F_{\text{ст}1}+F_{\text{уд}1}$$

$$\frac{K_1K_2}{\left(K_1^{\frac{2}{3}}+K_2^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{3}{2}}} = \sum_{i=1}^{z}(\delta_{\text{ст}i})^{\frac{3}{2}}\left\{\frac{h\cos\alpha_0}{h+\delta}+\right.$$

$$+\frac{1-\left(\frac{h\cos\alpha_0}{h+\delta}\right)}{(h+\delta)\cos\alpha_0}\left[\delta_m^c\cos_{\psi 1}i+\delta_m^c\sin\psi_{1i}\right]\left.\right\}\times$$

$$\times x\cos\psi_{1i}e(\delta_{\text{ст}i}) = F_{\text{ст}2}+F_{\text{уд}2}+K_{\text{м}}\delta_m^s\frac{h\cos}{h+\delta}; \quad (9)$$

$$\frac{K_1K_2}{\left(K_1^{2/3}+K_2^{2/3}\right)^{3/2}} = \sum_{i=1}^{z}(\delta_{\text{ст}i})^{\frac{3}{2}}\left\{\frac{h\cos\alpha_0}{h+\delta}+\right.$$

$$\left.+\frac{1-\left(\frac{h\cos\alpha_0}{h+\delta}\right)^2}{(h+\delta)\cos\alpha_0}\left[\delta_m^s\cos\psi_{1i}+\delta_m^s\sin\psi_{1i}\right]\right\}$$

$$\sin\psi_{1i}e(\delta_{\text{ст}i}) = F_{\text{ст}3}+F_{\text{уд}3}+K_{\text{м}}\delta_m^s\frac{h\cos a_0}{h+\delta},$$

где $K_{\text{м}}$ – коэффициент, характеризующий силу одностороннего магнитного движения;

$h = r_1+r_2+D_{\text{ш}}$ – конструктивный параметр подшипника;

r_1, r_2 – радиусы кривизны беговых дорожек наружного и внутреннего колец соответственно.

Подставляя (6) в (4), получим аналитическое выражение для статической деформации i-го шарика в зависимости от погрешностей элементов подшипника и параметров ударного воздействия:

$$\delta_{\text{ст}i} = \delta_1+\delta_2\cos\left[\psi_1+\frac{2\pi}{z}(i=1)\right]+$$

$$+\delta_3\sin\left[\psi_1+\frac{2\pi}{z}(i-1)\right]-$$

$$-\sum_{q=1}^{2}r_{qk}\cos\left[k\psi_q+k\frac{2\pi}{z}(i-1)+\varphi_q\right], \qquad (10)$$

где $\delta_{qk} = -r_{qk}$ – величина погрешности [4].

Анализируя выражение (10), можно сделать вывод о том, что статическая деформация зависит не только от параметров погрешностей и общего режима работы опоры качения, но и от параметров внешнего ударного воздействия. Составляющие деформации флуктуируют с частотами вращения ротора и сепаратора, а также с частотой следования ударных импульсов. Кроме того, составляющие деформации заметно проявляют себя на комбинационных частотах.

Далее проведем расчет жесткостных характеристик подшипника. Пренебрегая силами демпфирования и учитывая (2), а также условия ста-

тического равновесия внутреннего кольца подшипника, систему уравнения (1) преобразуем к виду:

$$M\ddot{x}_{1(2,3)} + \left\{ K_2' \sum_{i=1}^{z} (\delta_{2\text{ст}i})^{\frac{1}{2}} e(\delta_{2\text{ст}i}) \right\} \Delta_{1(2,3)} X^T_{1(2,3)} =$$

$$= K_2 \sum_{q=1}^{2} \sum_{i=1}^{z} (\delta_{2\text{ст}i})^{\frac{1}{2}} e(\delta_{2\text{ст}i}) H_{1(2,3)} (\delta r_q - \delta d_i), \quad (11)$$

$$\Delta_1 = \left[\sin^2 \alpha_i, \sin 2\alpha_i \cos\psi_{1i}, \sin 2\alpha_i, \sin\psi_{1i} \right];$$

$$\Delta_2 = \left[\sin 2a_i \cos\psi_{1i}, \cos^2 a_i \cos\psi_{1i}, \cos^2 a_i \sin 2\psi_{1i} \right];$$

$$\Delta_3 \left[\sin 2a_i \sin\psi_{1i}, \cos^2 a_i \sin 2\psi_{1i}, \cos^2 a_i \sin^2 \psi_{1i} \right];$$

$X^{\text{T}}_{1(2,3)} = [x_1, x_2, x_3]$, T – знак транспонирования

$$H_1 = \sin\alpha_i; H_2 = \cos\alpha_i \cos\psi_{1i}; H_3 = \cos\alpha_i \sin\psi_{1i};$$

$$K_2' = \frac{K_2 K_2^{2/3}}{K_1^{2/3} + K_2^{2/3}}.$$

Для подшипников с равномерными спектрами профилограмм и преобладающими погрешностями q-го кольца функцию $(\delta_{2\text{ст}i})^{\frac{1}{2}} e(\delta_{2\text{ст}i})$ в силу ее периодичности с учетом (10) можно представить рядом [4]:

$$(\delta_{2\text{ст}i})^{1/2} e(\delta_{2\text{ст}i}) = \gamma_{0+} + \sum\nolimits_n \gamma_{1n} \times$$
$$\times \cos(n\psi_{\text{уд}} + \varphi'_{1n}) + \sum\nolimits_p \gamma_{2p} \cos\times$$
$$\times \left[p \left(\psi_q + \frac{2\pi}{z}(i-1) + \varphi_{2p} \right] + \sum\nolimits_{n,p} \gamma_{3p} \cos\times \right.$$
$$\times \left\{ n\psi_{\text{уд}} \pm p \left[\psi_q + \frac{2\pi}{z}(i-1) + \varphi_{3p} \right\} + \right.$$
$$+ \sum\nolimits_{n,p} \gamma_{4p} \cos\times \left\{ n\psi_{\text{уд}} \pm p\psi_q + \psi_1 + \right.$$
$$+ \frac{(1 \pm p)2\pi}{z}(i-1) + \varphi_{4p} \left. \right\} + \sum\nolimits_{n,p} \gamma_{5p} \cos\times$$
$$\times \left\{ n\psi_{\text{уд}} \pm p\psi_q - \psi_1 + \frac{(-1 \pm p)2\pi}{z}(i-1) + \varphi_{5p} \right\}, \quad (12)$$

где γ – коэффициент разложения в ряд функции контактирования;

p – целое число.

Принимая во внимание (9), (11), (12) и учитывая, что

$$a' \gg a_{n1}, a_{n2,} a_{n3}, a_n;$$
$$a^{1c} \gg a_n^{1c}, a_{n1}^{1c}, a_{n2}^{1c}, a_{n3}^{1c};$$
$$a^{1s} \gg a_n^{1s}, a_{n1}^{1s}, a_{n2}^{1s}, a_{n3}^{1s};$$

можно получить формулу для определения жесткости для шарикоподшипника в условиях периодического удара в зависимости от углового положения колец и сепаратора. В табл. 1 приведены значения амплитуд и частот изменения жесткостей в главных и перекрестных направлениях, причем переменная составляющая угла контакта, входящая в состав некоторых амплитуд изменения жесткости, определяется из выражения

$$\alpha_m = \left[\left(\alpha^{1c} \right)^2 + \left(\alpha^{1s} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Наличие периодических ударных воздействий на подшипник приводит к значительному расширению гармонического состава изменений жесткостей.

2. Жесткость подшипника при наличии производственных погрешностей изготовления и сборки изменяется не только с частотами, кратными частоте вращения сепаратора $sz\omega_1$ и разностной частоте $sz\omega_2 = sz(\omega_1 - \omega_{\text{в}})$, но и с частотами, кратными частоте ударных воздействий $n\omega_{\text{уд}}$, а также с комбинационными частотами $n\omega_{\text{уд}} \pm sz\omega_q$; $n\omega_{\text{уд}} \pm (sz \pm 1)\omega_q \pm \omega_1$; $n\omega_{\text{уд}} \pm (sz \pm 2)\omega_q \pm \pm 2\omega_1$; $(sz \pm 1)\omega_q \pm \omega_1$.

3. Большой гармонический состав жесткости в условиях периодического воздействия будет влиять на число областей параметрических резонансов.

Библиографический список

1. *Круглов Ю. А., Туманов Ю. А.* Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1986. 222 с.

2. *Ленк А., Ренитц Ю.* Механические испытания приборов и аппаратов: пер. с нем. П. С. Богуславского. М.: Мир, 2000. 272 с.

3. *Голубков В. А., Кулаков А. В.* Надежность роторных устройств приборов в условиях внешней вибрации. Л.: Лен. ин-т авиац. Приборостр., 1985. 5 с.

4. *Явленский А. К., Явленский К. Н.* Теория динамики и диагностики систем трения качения. ЛГУ: Л., 1978. 184 с.

Таблица 1

Гармонический состав жесткости РС в условиях периодического ударного воздействия

Параметры жесткости	Амплитуда изменения жесткости	Частота изменения жесткости
C_{11}	$K_2' z\gamma_0 \sin^2\alpha'$	–
	$K_2' z\gamma_{1p} \sin^2\alpha'$	$p\omega_{уд}$
	$K_2' z\gamma_{2(sz)} \sin^2\alpha'$	$sz\omega_{уд}$
	$K_2' z\gamma_{3(sz)} \sin^2\alpha'$	$n\omega_{уд} \pm sz\omega_q$
	$K_2' z\gamma_{4(sz\pm1)} \sin^2\alpha'$	$n\omega_{уд} \pm (sz\pm1)\omega_q \overset{\pm}{\pm}\omega_1$
	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_m \sin^2\alpha'\gamma_{2(sz\mp2)}$	$(sz\pm1)\omega_q \pm \omega_1$
	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_m \sin^2\alpha'\gamma_{4(sz\pm2)}$	$n\omega_{уд} + (sz\pm2)\omega_q \overset{\pm}{\pm2}\omega_1$
C_{12}, C_{21}	$K_2' z\gamma_0 \cos\alpha'\alpha_m$	–
	$K_2' z\cos 2\alpha'\alpha_m\gamma_{1p}$	$p\omega_{уд}$
	$K_2' z\cos 2\alpha'\alpha_m\gamma_{2(zs)}$	$sz\omega_q$
	$K_2' z\cos 2\alpha'\alpha_m\gamma_{3(zs)}$	$n\omega_{уд}\pm sz\omega_q$
	$K_2' z\cos 2\alpha'\alpha_m\gamma_{4(sz\pm1)}$	$n\omega_{уд} \pm(sz\pm1)\omega_q \overset{\pm}{\pm}\omega_1$
	$K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{2(sz\pm1)}$	$(sz\pm1)\omega_q\pm \omega_1$
	$K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{3(sz\pm1)}$	$n\omega_{уд} \pm(sz \overset{\pm}{\pm} 1)\ \omega_q \overset{\pm}{\pm}\omega_1$
	$K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{4(sz)}$	$n\omega_{уд}\pm sz\omega_q$
	$K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{4(sz\pm2)}$	$n\omega_{уд} +(sz\pm2)\omega_q\pm2\omega_1$
	$K_2' z\sin 2\alpha'\ \gamma_{4(sz-2)}$	$n\omega_{уд} - (sz\pm2)\omega_q\pm2\omega_1$
C_{13}, C_{31}	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{2(sz\pm1)}$	$\omega_1\pm (sz\pm1)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{3(sz\pm1)}$	$\omega_1\pm n\omega_{уд}\pm(sz\mp 1)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{3(sz\pm1)}$	$\omega_1\pm n\omega_{уд}\mp(sz\pm1)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{4(sz\pm2)}$	$2\omega_1+ n\omega_{уд}\mp(sz\pm2)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{4(sz)}$	$n\omega_{уд}\pm sz\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\gamma_{5(sz\mp2)}$	$2\omega_1 - n\omega_{уд}\mp(sz\pm2)\omega_q$
	$\frac{1}{2}K_2' z\cos 2\alpha'\alpha_m\gamma_{2(sz\mp2)}$	$2\omega_1\pm n\omega_{уд}\pm(sz\mp 2)\omega_q$
	$\frac{1}{2}K_2' z\cos 2\alpha'\alpha_m\gamma_{3(sz\mp2)}$	$2\omega_1\pm(sz\mp 2)\omega_q$
	$\frac{1}{2}K_2' z\cos 2\alpha'\alpha_m\gamma_{3(sz\pm2)}$	$2\omega_1\pm n\omega_{уд}\pm(sz\pm 2)\omega_q$

Окончание табл. 1

Параметры жесткости	Амплитуда изменения жесткости	Частота изменения жесткости
C_{22}, C_{33}	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_0 \cos^2\alpha'$	–
	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_{1n}\cos^2\alpha'$	$n\omega_{\text{уд}}$
	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_{2(sz)}\cos^2\alpha'$	$sz\omega_{\text{q}}$
	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_{3(sz)}\cos^2\alpha'$	$n\omega_{\text{уд}} \pm sz\omega_q$
	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_{4(sz\pm1)}\cos^2\alpha'$	$n\omega_{\text{уд}} \pm(sz \mp 1)\omega_q + \omega_1$
	$\frac{1}{2}K_2' z\gamma_{5(sz\pm1)}\cos^2\alpha'$	$n\omega_{\text{уд}} \pm(sz\pm1)\omega_q - \omega_1$
	$\frac{1}{4}K_2' z\cos^2\alpha'\gamma_{2(sz\mp2)}$	$(sz\pm2)\omega_q \pm 2\,\omega_1$
C_{23}, C_{32}	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\alpha_m\gamma_{3(sz\pm1)}$	$\omega_1 \pm n\omega_{\text{уд}} \mp (sz \pm 1)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\sin 2\alpha'\alpha_m\gamma_{4(sz)}$	$n\omega_{\text{уд}} \pm sz\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\cos^2\alpha'\gamma_{2(sz\mp2)}$	$2\omega_1 \pm (sz \mp 2)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\cos^2\alpha'\gamma_{3(sz\mp2)}$	$2\omega_1 \pm n\omega_{\text{уд}} \pm (sz \mp 2)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\cos^2\alpha'\gamma_{3(sz\pm2)}$	$2\omega_1 \pm n\omega_{\text{уд}} \mp (sz \pm 2)\omega_q$
	$\frac{1}{4}K_2' z\cos^2\alpha'\gamma_{4(sz\mp3)}$	$3\omega_1 + n\omega_{\text{уд}} \pm (sz \mp 3)\omega_q$

УДК 621.311.019.3

А. В. Горпинич
кандидат технических наук, доцент
ГВУЗ Приазовский государственный технический университет, Украина

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Представлены выражения для оценки показателей надежности конденсаторов звена постоянного тока преобразователей частоты. Для моделирования отказов конденсаторов звена постоянного тока были использованы распределение Вейбулла и нормальное распределение. На примере преобразователя частоты серии SINAMICS S120 фирмы Siemens, который используется для привода правильной машины прокатного стана, показано, что отказы модулей двигателя из-за пробоя электролитических конденсаторов звена постоянного тока, зарегистрированные в период с мая 2012 г. по октябрь 2012 г., могли произойти за счет повышенной температуры окружающей среды и дополнительного нагрева высокочастотными составляющими пульсирующего тока.

Ключевые слова: *конденсатор звена постоянного тока, преобразователь частоты, высокочастотные составляющие тока и напряжения, наработка до отказа, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности.*

A. V. Gorpinich
PhD, Tech., Associate Professor
Pryazovskyi State Technical University, Ukraine

EVALUATION OF RELIABILITY INDICES FOR DC-LINK CAPACITORS IN FREQUENCY CONVERTERS

Expressions to evaluate the reliability indices for dc-link capacitors in frequency converters are presented. Weibull and normal distribution were used to model failures of dc-link capacitors. A case study with the Siemens SINAMICS S120 frequency converter for driving of rolling mill leveler shows that the failures of motor modules due to breakdown of electrolytic dc-link capacitors registered for the time frame from May 2012 to October 2012 can be caused by increased ambient temperature and additional heating due to high-frequency components of the ripple current.

Keywords: *dc-link capacitor, frequency converter, high-frequency current and voltage components, mean time to failure, survival probability, availability.*

В последние годы наблюдается широкомасштабное внедрение преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока (ПЧПЗ) в регулируемом электроприводе, на солнечных и ветровых электростанциях (в том числе и с асинхронными генераторами двойного питания), в электромобилях, дизель-электрических системах тяги, тяги переменного тока и т. д. В таких преобразователях частоты для формирования выходного синусоидального переменного напряжения используют автономный инвертор, который формирует напряжение заданной формы на обмотках двигателя, как правило, методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

В качестве электронных ключей в инверторах применяются запираемые тиристоры GTO и их усовершенствованные модификации GCT, IGCT, SGCT или биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT, которые коммутируются с очень высокой скоростью нарастания выходного напряжения (до 50 кВ/мкс) и частотой следования импульсов (порядка 10–50 кГц).

Это приводит к тому, что в кривой выходного напряжения и в напряжении звена постоянного тока появляются высокочастотные составляющие напряжения с частотой в несколько килогерц (соответственно, появляются и пульсации тока). В качестве примера рассмотрим результаты исследований искаженных кривых напряжения и тока, выполненных автором на выходе ПЧПЗ типа LS800-42K2-TD с помощью цифрового осциллографа типа АКТАКОМ АСК-2034

Рис. 1. ПЧПЗ типа LS800-42K2-TD;
Входные параметры: 3Ф ~ 380–460 В; 50/60 Г;
Выходные параметры: 3Ф ~ 0–460 В; 0,1–400 Гц;
5,7 кВА; 7,5 А

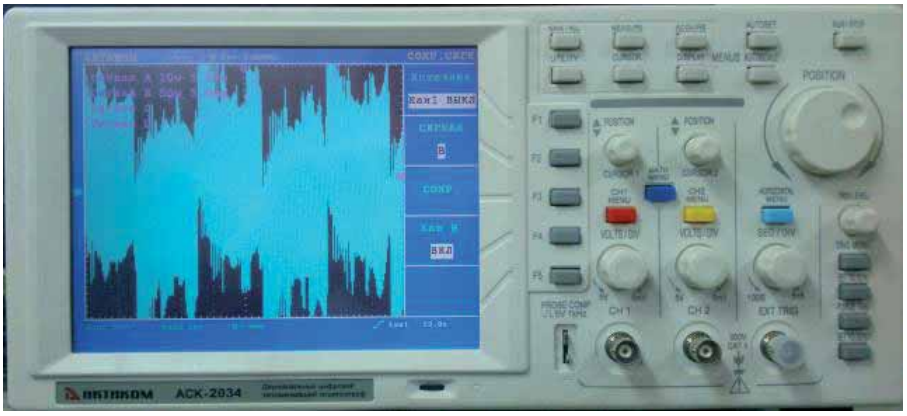


Рис. 2. Двухканальный цифровой осциллограф типа АКТАКОМ АСК-2034

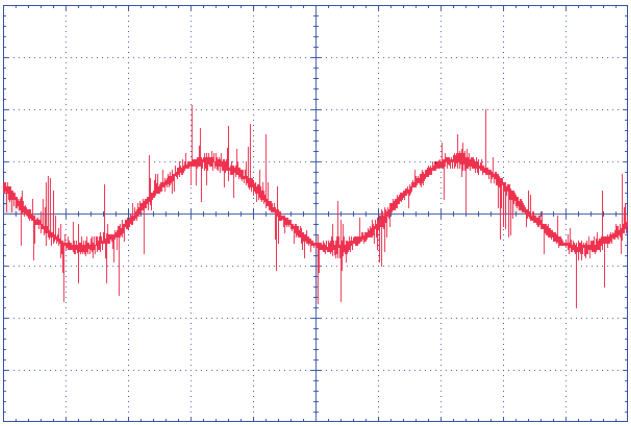


Рис. 3. Осциллограмма фазного тока на выходе ПЧПЗ

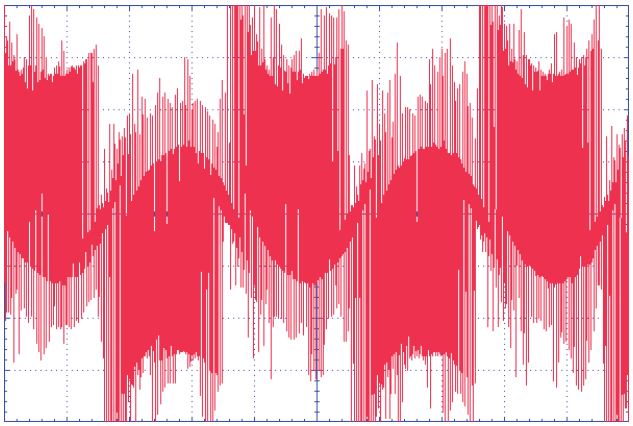


Рис. 4. Осциллограмма линейного напряжения на клеммах приводимого ПЧПЗ двигателя

(рис. 1–4) [1], и результаты измерений тока конденсатора звена постоянного тока и выходного фазного тока, выполненных в системе привода электромобиля и представленных в [2] (рис. 5, 6).

Параметры: полоса частот 25 МГц, частота дискретизации 100 МГц.

Визуальный анализ осциллограммы фазного тока на выходе ПЧПЗ, представленной на рис. 3,

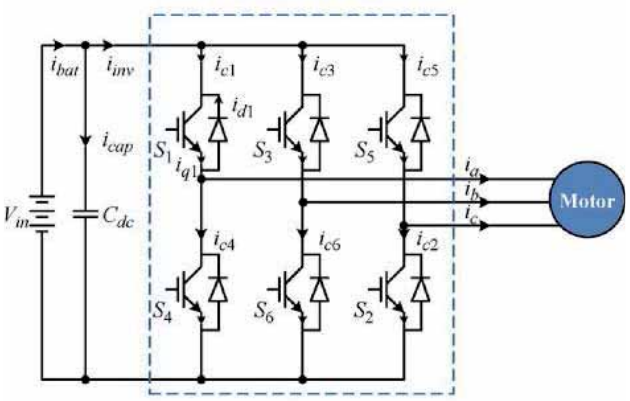


Рис. 5. Типовая схема системы привода электромобиля

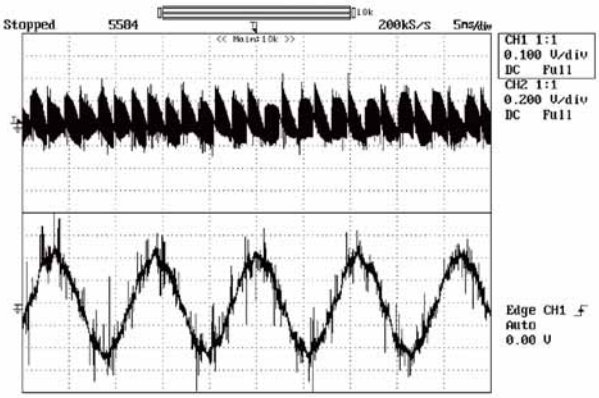


Рис. 6. Полученные в результате измерений в системе привода электромобиля ток конденсатора звена постоянного тока (верхняя кривая) и выходной фазный ток (нижняя кривая)

показывает, что она имеет форму, сходную с кривой фазного тока, полученной в результате исследований в системе привода электромобиля (рис. 6). Как видно из рис. 5, схема системы привода электромобиля имеет явное сходство со структурной схемой ПЧПЗ с той лишь разницей, что отсутствует выпрямитель, вместо которого питание подается непосредственно от аккумуляторной батареи. Однако, учитывая тот факт, что источником высокочастотных составляющих является инвертор, можно заключить, что сходство кривых выходного фазного тока объясняется работой ключей инвертора, которые коммутируются с частотой порядка нескольких кГц (для ПЧПЗ типа LS800-42K2-TD частота ШИМ по паспорту составляет от 2 до 16 кГц). Совмещенные осциллограммы выходного фазного тока показаны на рис. 7, 8.

Выполненный в [2] анализ частотных спектров пульсирующего тока конденсатора звена постоянного тока для разных режимов работы и стратегий модуляции показал, что наибольшие величины высокочастотных составляющих имеют место при пространственно-векторной модуляции (space vector modulation (SVM)) в режиме, когда индекс модуляции равен $M = 0{,}625$, а коэффициент мощности нагрузки составляет $\cos\varphi = 0{,}954$. В этом случае амплитуда составляющей 20 кГц равна 52% от амплитуды фазного выходного тока, амплитуда составляющей 40 кГц – 14%, амплитуда составляющей 60 кГц – 9,9%, амплитуда составляющей 80 кГц – 9%.

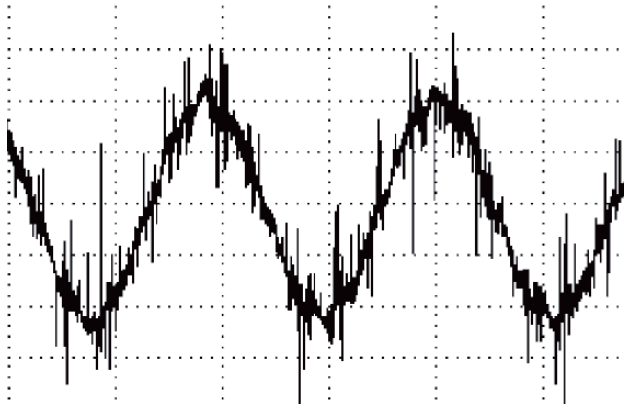


Рис. 7. Осциллограмма фазного тока на выходе инвертора системы привода электромобиля

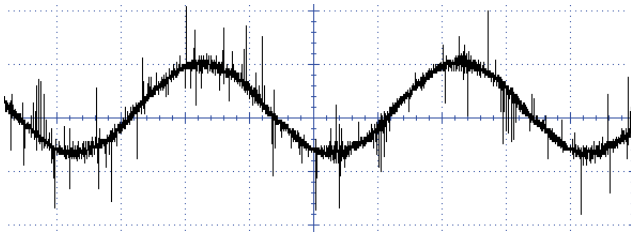


Рис. 8. Осциллограмма фазного тока на выходе ПЧПЗ

Реализованное в среде Wolfram Mathematica с помощью так называемой «упрощенной комплексной wavelet-функции Морле» амплитудно-частотно-временно́е представление искаженных кривых напряжения и тока, зарегистрированных на выходе ПЧПЗ типа LS800-42K2-TD, позволило установить, что в спектральном составе присутствуют высокочастотные составляющие с амплитудами до 199% по напряжению и до 78% по току от амплитуды основной частоты [1]. Длительность этих составляющих в диапазоне частот 0,76–97,31 кГц достигает десятков микросекунд – единиц миллисекунд, а фронт близок к прямоугольному. Полученные значения амплитуд и длительностей свидетельствуют о том, что высокочастотные составляющие с такими параметрами по своему характеру соответствуют коммутационным импульсам тока и напряжения, параметры которых нормируются стандартами IEC. Например, амплитуды перенапряжений, вызванных коммутацией вентилей

низковольтных преобразователей, могут достигать 150% от амплитуды напряжения основной частоты (периодично) или даже 250% (непериодично), поэтому стандарт IEC 61800 рекомендует их учитывать при проектировании [3].

Наличие высокочастотных составляющих значительной амплитуды приводит к ускоренному тепловому и электрическому старению изоляции обмоток приводимого ПЧПЗ двигателя, соединительного кабеля и конденсаторов звена постоянного тока. Кроме того, возможно возникновение резонансных явлений на таких частотах, приводящих к выходу из строя элементов ПЧПЗ и двигателя. Так, на прокатном стане 3600 металлургического комбината «Азовсталь» за время эксплуатации в период с мая 2012 г. по октябрь 2012 г. были зафиксированы два случая выхода из строя модулей двигателя преобразователя частоты серии SINAMICS S120 фирмы Siemens из-за пробоя конденсаторов звена постоянного тока. ПЧПЗ серии SINAMICS S120 используется на прокатном стане для привода правильной машины. Мощность приводимых асинхронных двигателей составляет 1,5 МВт. Звено постоянного тока входит в состав модуля двигателя и состоит из трех отдельных модулей по 9 электролитических конденсаторов фирмы EPCOS в каждом.

Следует отметить, что среди элементов силового преобразователя с ШИМ на долю электролитических конденсаторов приходится 60% отказов (рис. 9) [4]. При этом температура, вибрация и влажность – это три основных фактора, которые прямым или косвенным образом влияют на появление отказов элементов силовой электроники. Исследование причин отказов электронного оборудования, проведенное ВВС США в 80-х гг. в рамках программы комплексирования бортового радиоэлектронного оборудования, показало, что доминирующим фактором является температура (рис. 10) [5].

Цель работы – на примере ПЧПЗ серии SINAMICS S120 фирмы Siemens, который используется для привода правильной машины

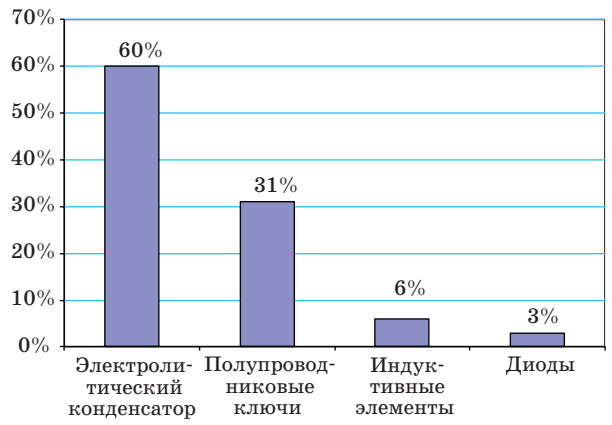


Рис. 9. Распределение отказов по элементам силового преобразователя с ШИМ

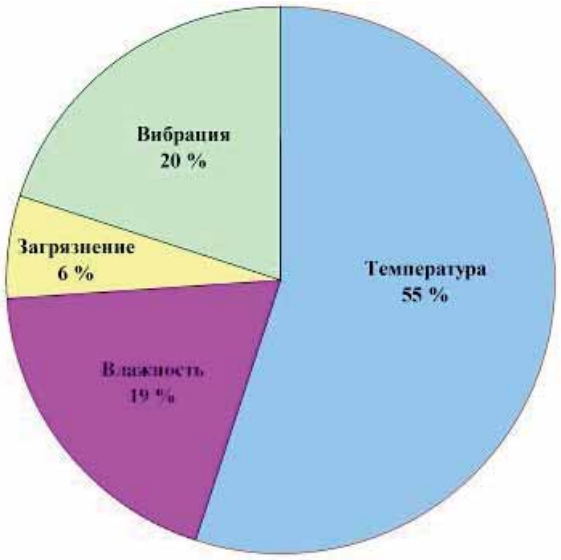


Рис. 10. Причины отказов электронного оборудования

прокатного стана 3600 металлургического комбината «Азовсталь», представить алгоритм оценки влияния высокочастотных составляющих пульсирующего тока на нагрев, сокращение срока службы и снижение показателей надежности конденсаторов звена постоянного тока, а также рекомендации по повышению их эксплуатационной надежности (в частности, вместо 9 электролитических конденсаторов типа B43564 фирмы EPCOS можно использовать 4 пленочных конденсатора типа FFVE4I0227K фирмы AVX).

Вопросы влияния высокочастотных составляющих пульсирующего тока на характеристики и преждевременный выход из строя электролитических конденсаторов звена постоянного тока достаточно подробно рассмотрены в работах [6–12], однако их влияние на показатели надежности пленочных конденсаторов с самовосстанавливающейся изоляцией исследовано недостаточно как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе. Для оценки показателей надежности конденсаторов звена постоянного тока с учетом влияния высокочастотных составляющих пульсирующего тока на ускоренное тепловое старение изоляции необходимо знать параметры электрической модели, частотный спектр пульсирующего тока, параметры тепловой модели и параметры модели надежности, которые позволят определить потери мощности, температуру в наиболее нагретой точке и наработку до отказа, вероятность безотказной работы и коэффициент готовности.

Основными параметрами электрической модели являются эквивалентное последовательное сопротивление (equivalent series resistance (ESR)) и пульсирующий ток. Под пульсирующим током понимается среднеквадратическое

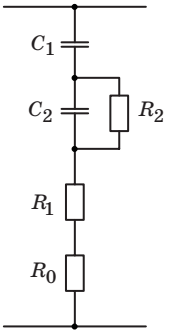


Рис. 11. Эквивалентная схема замещения электролитического конденсатора: R_0 –сопротивление фольги и выводов; R_1 – сопротивление электролита; C_1 – емкость на выводах конденсатора; R_2 и C_2 – сопротивление и емкость, характеризующие диэлектрические потери соответственно

значение переменного тока, вызванного пульсирующим напряжением. Величина пульсирующего тока зависит от тангенса угла потерь, связанного с ESR. В свою очередь тангенс угла потерь зависит от частоты приложенного напряжения, поэтому пульсирующий ток также зависит от частоты. Обычно в технических описаниях приводятся значения максимально допустимого тока пульсаций для частоты 100 или 120 Гц, в некоторых случаях – для частоты 10 или 20 кГц. Кроме того, приводится график нормированных зависимостей для пересчета на другие рабочие частоты.

Эквивалентная схема замещения электролитического конденсатора показана на рис. 11.

В соответствии с рис. 11 полное сопротивление конденсатора:

$$Z_{\text{cap}} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} - j2\pi f C_2} + R_1 + R_0 - \frac{j}{2\pi f C_1}, \qquad (1)$$

где f – частота.

Для оценки дополнительных потерь мощности и нагрева, которые вызываются пульсирующим током, необходима только действительная часть полного сопротивления конденсатора:

$$\text{ESR} = \text{Real}(Z_{\text{cap}}); \qquad (2)$$

$$\text{Real}(Z_{\text{cap}}) = R_1 + R_0 + \frac{R_2}{1 + (2\pi f R_2 C_2)^2}. \qquad (3)$$

Повышение температуры приводит к снижению ESR, потому что сопротивление R_1 снижается из-за увеличения проводимости электролита. Влияние температуры на сопротивление R_1 можно оценить с помощью выражения

$$R_1 = R_{1\text{base}} \exp\left(\frac{T_{\text{base}} - T_{\text{core}}}{F}\right), \qquad (4)$$

где $R_{1\text{base}}$ – сопротивление R_1 при базовой температуре T_{base} (27 °C); T_{core} – температура конденсатора, °C; F – температурный коэффициент, $К^{-1}$.

Параметры эквивалентной схемы замещения электролитического конденсатора типа B43564 фирмы EPCOS, который используется в звене постоянного тока ПЧПЗ серии SINAMICS S120 привода правильной машины, приведены в табл. 1 [2, 13].

Рассмотрим возможность применения в звене постоянного тока ПЧПЗ серии SINAMICS S120 привода правильной машины пленочных конденсаторов вместо электролитических. Для этого с учетом допустимого тока выбираем в составе каждого модуля звена постоянного тока вместо 9 электролитических конденсаторов типа B43564 фирмы EPCOS 4 пленочных конденсатора типа FFVE4I0227K фирмы AVX. При частоте выше 1 кГц ESR пленочного конденсатора можно определить как функцию от частоты по выражению [2]:

$$\text{ESR}(f) = (R_s - A_s) + K(f) \cdot A_s, \qquad (5)$$

где R_s – базовое сопротивление; A_s – параметр, который задается производителем и связан с размерами конденсатора; $K(f)$ – функция, учитывающая влияние частоты (обычно эта функция задается производителем в виде графика).

$K(f)$ можно представить в виде кубической полиномиальной функции:

$$K(f) = k_3 \cdot f^3 + k_2 \cdot f^2 + k_1 \cdot f + k_0, \qquad (6)$$

где коэффициенты k_0–k_3 оцениваются на основе метода наименьших квадратов.

В отличие от электролитических конденсаторов, значение ESR пленочного конденсатора увеличивается с ростом частоты. Его чувствительность к температуре значительно меньше, чем у электролитических конденсаторов, потому что ESR определяется главным образом сопротивлениями выводов конденсатора, а не сопротивлением электролита. Параметры пленочного конденсатора типа FFVE4I0227K фирмы AVX приведены в табл. 2 [14].

Таблица 1

Параметры электролитического конденсатора типа B43564 фирмы EPCOS

Параметры	Значение
ESR при частоте 100 Гц	23 мОм
Максимальное значение полного сопротивления при частоте 10 кГц	28 мОм
Сопротивление фольги и выводов R_0	5,03 мОм
Сопротивление электролита $R_{1\text{base}}$ при базовой температуре T_{base} (27 °C)	6 мОм
Температурный коэффициент F	21 $К^{-1}$
Сопротивление, характеризующее диэлектрические потери R_2	20 мОм
Емкость на выводах конденсатора C_1	4700 мкФ
Емкость, характеризующая диэлектрические потери C_2	11,6 мкФ
Температура конденсатора T_{core}	40 °C
Максимально допустимый ток	37 А

Таблица 2

Параметры пленочного конденсатора типа FFVE4I0227K фирмы AVX

Параметры	Значение
ESR при частоте 100 Гц	0,9 мОм
Базовое сопротивление R_s	0,9 мОм
Емкость на выводах конденсатора C_1	220 мкФ
Параметр A_s	0,23
Коэффициент k_3	$3{,}173 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент k_2	–0,000124
Коэффициент k_1	0,02369
Коэффициент k_0	1,014
Максимально допустимый ток	100 А

Поскольку значения ESR электролитических и пленочных конденсаторов зависят от частоты, для характеристики пульсирующего тока конденсатора при данной частоте вводят специальный коэффициент

$$M_f = \frac{I_f}{I_{100}} = \sqrt{\frac{\mathrm{ESR}_{100}}{\mathrm{ESR}_f}}, \qquad (7)$$

где I_{100} и ESR_{100} – номинальный пульсирующий ток и значение ESR при частоте 100 Гц соответственно; I_f и ESR_f – пульсирующий ток и значение ESR при частоте f.

Для электролитического и пленочного конденсаторов значения ESR_f и коэффициентов M_f при разных частотах приведены в табл. 3.

При принятой на прокатном стане 3600 металлургического комбината «Азовсталь» комплектации модулей двигателя ПЧПЗ серии SINAMICS S120 используется пространственно-векторная стратегия модуляции. Как уже отмечалось, при такой стратегии модуляции в режиме, когда индекс модуляции равен $M = 0{,}625$, а коэффициент мощности нагрузки составляет $\cos\varphi = 0{,}954$, имеют место наибольшие величины высокочастотных составляющих, поэтому именно для соответствующего этому режиму частотного спектра пульсирующего тока выполним расчет потерь мощности в электролитическом и пленочном конденсаторе. Эти потери можно представить в виде суммы потерь мощности от отдельных высокочастотных составляющих с учетом коэффициента M_f, характеризующего пульсирующий ток конденсатора при данной частоте:

$$P_{\mathrm{cap}} = \sum \mathrm{ESR}_{f_i} \cdot (I_{\mathrm{cap}\,f_i})^2 = \mathrm{ESR}_{100} \sum \left(\frac{I_{\mathrm{cap}\,f_i}}{M_f} \right)^2, \qquad (8)$$

где ESR_{f_i} – величина ESR при частоте f_i; $I_{\mathrm{cap}\,f_i}$ – среднеквадратическое значение тока составляющей частоты f_i.

Результаты расчета потерь мощности приведены в табл. 4 (значения ESR_{f_i} и M_f приведены в табл. 3).

Температуру конденсатора можно рассчитать на основании потерь мощности и эквивалентной тепловой схемы замещения (рис. 12).

Эквивалентное тепловое сопротивление между наиболее нагретой точкой конденсатора и окружающей средой:

$$R_{th} = \left[R_{hc} + \frac{R_{ca}(R_{bp} + R_{pa})}{R_{ca} + R_{bp} + R_{pa}} \right]. \qquad (9)$$

Эквивалентное тепловое сопротивление электролитического конденсатора, прижатого к массивной металлизированной монтажной плате, в соответствии с рекомендациями [2] можно принять равным $R_{th} = 1{,}02\,^{\circ}\mathrm{C/Вт}$. Эквивалентное тепловое сопротивление пленочного конденсатора

Таблица 3

Значения ESR_f и коэффициентов M_f для электролитического и пленочного конденсаторов при разных частотах

Частота, кГц	Электролитический конденсатор типа B43564 фирмы EPCOS		Пленочный конденсатор типа FFVE4I0227K фирмы AVX	
	ESR_f, мОм	M_f	ESR_f, мОм	M_f
10	28,256	0,902	0,955	0,971
20	28,244	0,902	1,001	0,948
30	28,223	0,903	1,043	0,929
40	28,193	0,903	1,08	0,913
50	28,155	0,904	1,113	0,899
60	28,109	0,905	1,143	0,887
70	28,055	0,905	1,17	0,877
80	27,992	0,906	1,194	0,868
90	27,922	0,908	1,216	0,86
100	27,845	0,909	1,236	0,853

Таблица 4

Результаты расчета потерь мощности в электролитическом и пленочном конденсаторах

Частота, кГц	$I_{\mathrm{cap}\,f_i}$, %	Электролитический конденсатор типа B43564 фирмы EPCOS		Пленочный конденсатор типа FFVE4I0227K фирмы AVX	
		$I_{\mathrm{cap}\,f_i}$, А	P_{cap}, Вт	$I_{\mathrm{cap}\,f_i}$, А	P_{cap}, Вт
10	2,1	0,777	12,099	2,1	3,185
20	52	19,24		52	
30	5	1,85		5	
40	14	5,18		14	
50	3	1,11		3	
60	9,9	3,663		9,9	
70	1,5	0,555		1,5	
80	9	3,33		9	
90	1,5	0,555		1,5	
100	3	1,11		3	

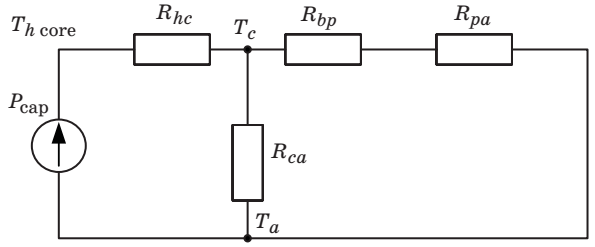


Рис. 12. Эквивалентная тепловая схема замещения конденсатора:

Тепловые сопротивления: R_{hc} – между наиболее нагретой точкой корпуса и основанием корпуса; R_{ca} – между основанием корпуса и окружающей средой; R_{bp} – между основанием корпуса и монтажной платой; R_{pa} – между монтажной платой и окружающей средой.

Температуры: $T_{h\,core}$ – в наиболее нагретой точке конденсатора; T_c – основания корпуса конденсатора; T_a – окружающей среды

типа FFVE4I0227K фирмы AVX принимаем равным $R_{th} = 7{,}2$ °C/Вт в соответствии с каталогом [14].

Температура в наиболее нагретой точке конденсатора

$$T_{h\,\mathrm{core}} = P_{\mathrm{cap}} R_{th} + T_a. \qquad (10)$$

При типичных условиях работы ПЧПЗ серии SINAMICS S120 привода правильной машины температура окружающей среды составляет $T_a = 40$ °C, поэтому в соответствии с выражением (10) для электролитического конденсатора $T_{h\,\mathrm{core}} = 52{,}3$ °C, а для пленочного конденсатора $T_{h\,\mathrm{core}} = 62{,}9$ °C.

Срок службы электролитического и пленочного конденсаторов можно определить следующим образом (учитывая, что их дополнительный нагрев на 10 °C приводит к сокращению срока службы в 2 раза):

$$V = V_{\mathrm{н}} \cdot 2^{-\frac{\Delta\tau}{10}} = V_{\mathrm{н}} \cdot e^{-\beta\Delta\tau}, \qquad (11)$$

где $V_{\mathrm{н}}$ – срок службы конденсатора при максимально допустимой температуре в наиболее нагретой точке, ч; $\Delta\tau$ – дополнительный нагрев, °C; $\beta = 0{,}0693\ ^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$ – коэффициент старения изоляции.

При допущении о нормальном законе распределения температуры $\Delta\tau$ математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) срока службы конденсатора

$$m_V = V_{\mathrm{н}} \exp\left(-\beta m_{\Delta\tau} + \frac{\beta^2}{2}\sigma_{\Delta\tau}^2\right); \qquad (12)$$

$$\sigma_V = m_V \sqrt{\exp\left(\beta^2\sigma_{\Delta\tau}^2\right) - 1}, \qquad (13)$$

где $m_{\Delta\tau}$ и $\sigma_{\Delta\tau}$ – МО и СКО дополнительного нагрева изоляции.

Для моделирования постепенных отказов конденсаторов звена постоянного тока, обусловленных ускоренным тепловым старением изоляции, апостериори могут быть использованы распределение Вейбулла и нормальное распределение времени безотказной работы. Опыт практического их применения в расчетах показателей надежности показывает, что при аппроксимации статистических данных возможны случаи, когда одни и те же данные могут быть одинаково успешно описаны и нормальным распределением, и распределением Вейбулла.

При использовании распределения Вейбулла функция надежности

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right], \qquad (14)$$

где b – параметр формы; a – параметр масштаба.

Условная вероятность отказа конденсатора в интервале t, следующем за интервалом T безотказной работы

$$P_f = F(t\,|\,T) = \frac{\exp\left[-\left(\frac{T}{a}\right)^b\right] - \exp\left[-\left(\frac{t+T}{a}\right)^b\right]}{\exp\left[-\left(\frac{T}{a}\right)^b\right]}. \qquad (15)$$

При этом соответствующая вероятность безотказной работы

$$P_r = R(t\,|\,T) = 1 - F(t\,|\,T) = \exp\left[-\left(\frac{t+T}{a}\right)^b + \left(\frac{T}{a}\right)^b\right]. \qquad (16)$$

Коэффициент простоя (средняя вероятность застать конденсатор в неработоспособном состоянии)

$$K_{\mathrm{п}} = \sum_{i=1}^{N}\left(1 - \frac{2i-1}{2N}\right) \times$$
$$\times \frac{\exp\left[-\left(\frac{(i-1)\frac{t}{N}+T}{a}\right)^b\right] - \exp\left[-\left(\frac{i\frac{t}{N}+T}{a}\right)^b\right]}{\exp\left[-\left(\frac{T}{a}\right)^b\right]}, \qquad (17)$$

где N – количество интервалов, каждый из которых имеет длину $\Delta t = t/N$.

Коэффициент готовности

$$K_{\mathrm{г}} = 1 - K_{\mathrm{п}}. \qquad (18)$$

МО и СКО срока службы конденсатора можно найти из выражений:

$$m_V = a\Gamma(1 + 1/b); \qquad (19)$$

$$\sigma_V^2 = a^2[\Gamma(1+2/b) - \Gamma^2(1+1/b)], \qquad (20)$$

где $\Gamma(1+1/b)$, $\Gamma(1+2/b)$ – гамма-функции от параметра формы b.

При известных значениях m_V и σ_V (уравнения (12), (13)) параметр формы b может быть найден из соотношения

$$\frac{\Gamma(1+2/b)}{\Gamma^2(1+1/b)} = 1 + \left(\frac{\sigma_V}{m_V}\right)^2. \qquad (21)$$

Зная параметр формы b, из уравнения (19) находится параметр масштаба a.

Если параметр формы $b \geq 3{,}9$, то расхождение между нормальным распределением и распределением Вейбулла становится незначительным. При использовании нормального распределения функция надежности

$$R(t) = \frac{0{,}5 + \Phi\left(\frac{m_V - t}{\sigma_V}\right)}{0{,}5 + \Phi\left(\frac{m_V}{\sigma_V}\right)}, \qquad (22)$$

где $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^t e^{-t^2/2}dt$ – интеграл вероятностей.

Условная вероятность отказа конденсатора

$$P_f = F(t\,|\,T) = \frac{\Phi\left(\frac{t+T-m_V}{\sigma_V}\right) + \Phi\left(\frac{m_V - T}{\sigma_V}\right)}{0{,}5 + \Phi\left(\frac{m_V - T}{\sigma_V}\right)}. \qquad (23)$$

Соответствующая вероятность безотказной работы

$$P_r = R(t\,|\,T) = 1 - F(t\,|\,T). \qquad (24)$$

Коэффициент простоя

$$K_{\text{п}} = \sum_{i=1}^{N}\left(1 - \frac{2i-1}{2N}\right) \times \frac{\Phi\left(\frac{i\frac{t}{N}+T-m_V}{\sigma_V}\right) - \Phi\left(\frac{(i-1)\frac{t}{N}+T-m_V}{\sigma_V}\right)}{0{,}5 + \Phi\left(\frac{m_V - T}{\sigma_V}\right)}. \qquad (25)$$

Коэффициент готовности можно определить по выражению (18).

С учетом полученных значений $T_{h\,\text{core}}$ можно принять, что для электролитического конденсатора $m_{\Delta\tau} = 12{,}3^\circ$ С, $\sigma_{\Delta\tau} = 3^\circ$ С, а для пленочного – $m_{\Delta\tau} = 22{,}9^\circ$ С, $\sigma_{\Delta\tau} = 5^\circ$ С. Результаты расчета показателей надежности конденсаторов при $T = 4000$ ч, $t = 1000$ ч представлены в табл. 5.

Таким образом, зафиксированные на прокатном стане металлургического комбината «Азовсталь» в период эксплуатации с мая 2012 г. по

Таблица 5

Параметры конденсаторов и результаты расчета показателей надежности

Параметры	Электролитический конденсатор типа B43564 фирмы EPCOS	Пленочный конденсатор типа FFVE4I0227K фирмы AVX
Количество	9 шт.	4 шт.
Емкость ед.	4700 мкФ	220 мкФ
Суммарная емкость	42300 мкФ	880 мкФ
Габариты	76,9×105,7 мм	84,5×51 мм
Максимально допустимый ток	37 А	100 А
Напряжение питания	400 В	400 В
Максимально допустимая температура	85 °С	105 °С
Срок службы при 85 °С	15000 ч	35000 ч
Стоимость ед.	112 $	86 $
Суммарная стоимость	1008 $	344 $
Показатели надежности при использовании распределения Вейбулла		
P_f	0,101	0,091
P_r	0,899	0,909
$K_{\text{п}}$	0,043	0,043
$K_{\text{г}}$	0,957	0,957
Показатели надежности при использовании нормального распределения		
P_f	0,104	0,082
P_r	0,896	0,918
$K_{\text{п}}$	0,043	0,038
$K_{\text{г}}$	0,957	0,962
Наработка до отказа, ч	6500	7600

октябрь 2012 г. случаи отказа модулей двигателя ПЧПЗ серии SINAMICS S120 привода правильной машины из-за пробоя электролитических конденсаторов звена постоянного тока могут объясняться комбинированным негативным воздействием высокочастотных составляющих пульсирующего тока и повышенной температуры окружающей среды в этот период. Несмотря на примерно одинаковые показатели надежности, полученные как с помощью распределения Вейбулла, так и с помощью нормального распределения, вместо 9 электролитических конденсаторов типа B43564 фирмы EPCOS лучше использовать 4 пленочных конденсатора типа FFVE4I0227K фирмы AVX, так как их макси-

мально допустимая температура на 20 °С больше и при повышенной температуре окружающей среды это позволит нивелировать негативное воздействие дополнительного нагрева за счет высокочастотных составляющих пульсирующего тока. Кроме того, их количество, габариты и стоимость при использовании в звене постоянного тока также существенно ниже (см. табл. 5).

Библиографический список

1. *Горпинич, А. В., Тараненко И. А.* Реализация амплитудно-частотно-временно́го представления искаженных кривых тока и напряжения на выходе преобразователя частоты типа LS800-42K2-TD с помощью упрощенной комплексной wavelet-функции Морле // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. 2014. № 7. С. 22–34.

2. Analysis and Evaluation of DC-link Capacitors for High-Power-Density Electric Vehicle Drive Systems / H. Wen, W. Xiao, X. Wen, P. R. Armstrong // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2012. Vol. 61. Nr. 7. P. 2950–2964.

3. Disturbances due to Voltage Distortion in the kHz Range – Experiences and Mitigation Measures / C. Unger, K. Kruger, M. Sonnenschein, R. Zurowski // Proc. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005). 6–9 June, 2005. Turin (Italy). P. 1–4.

4. Artificial Neural Network Algorithm for Condition Monitoring of Dc-Link Capacitors Based on Capacitance Estimation / H. Soliman, H. Wang, B. Gadalla, F. Blaabjerg // Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RESD). 2015. Vol. 1. Nr. 2. P. 294–299.

5. *Wang H., Liserre M., Blaabjerg F.* Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2013. Vol. 7. Nr. 2. P. 17–26.

6. *Gasperi M. L.* Life Prediction Modeling of Bus Capacitors in AC Variable-Frequency Drives // IEEE Transactions on Industry Applications. 2005. Vol. 41. Nr. 6. P. 1430–1435.

7. *Aeloiza E. C.* A Real Time Method to Estimate Electrolytic Capacitor Condition in PWM Adjustable Speed Drives and Uninterruptible Power Supplies // Proc. 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '05). 12–16 June, 2005. Recife (Brazil). P. 2867–2872.

8. *Abo-Khalil A. G., Lee D.-C.* DC-Link Capacitance Estimation in AC/DC/AC PWM Converters Using Voltage Injection // IEEE Transactions on Industry Applications. 2008. Vol. 44. Nr. 5. P. 1631–1637.

9. *Amaral A. M. R.,* Cardoso *A. J. M.* Using a Sinusoidal PWM to Estimate the ESR of Aluminum Electrolytic Capacitors // Proc. 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG '09). 18–20 March, 2009. Lisbon (Portugal). P. 691–696.

10. *Pang H. M., Bryan P. M. H.* A Life Prediction Scheme for Electrolytic Capacitors in Power Converters Without Current Sensor // Proc. 25th IEEE Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2010). 21–25 February, 2010. Palm Springs, California (USA). P. 973–979.

11. *Zhao K., Ciufo P., Perera S.* Lifetime Analysis of Aluminum Electrolytic Capacitor Subject to Voltage Fluctuations // Proc. 14th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2010). 26–29 Sept. 2010. Bergamo (Italy). P. 1–5.

12. Fault Diagnosis of Dc-Link Capacitors in Three-Phase AC/DC PWM Converters by Online Estimation of Equivalent Series Resistance / *X.-Si Pu etc.* // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60. Nr. 9. P. 4118–4127.

13. EPCOS Aluminum Electrolytic Capacitors / EPCOS AG, 2012. [Электронный ресурс]. URL: http://ferrite.ru/warehouse/index.php?dispatch=attachments.getfile&at-tachment_id=17696 (дата обращения: 20.03.2017).

14. AVX Medium Power Film Capacitors for Power Applications / AVX Corporation, 2015. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rcmicro.es/wp-content/up-loads/2015/05/mdpwrflm.pdf (дата обращения: 20.03.2017).

УДК 621.311

С. А. Гришанов
старший преподаватель
Донецкий национальный технический университет

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ

В работе основное внимание уделено анализу различной сложности математических моделей генератора. Анализируются модели, которые учитывают физические явления в массиве ротора в виде сложной многоконтурной схемы замещения и схемы замещения с переменными параметрами. Выполнены расчеты режимов в простейшей системе для случая потери возбуждения генератором и переходом в асинхронный режим. Сделан вывод о необходимости учета в модели генератора многоконтурных схем замещения.

Ключевые слова: *математическая модель, генератор, схема замещения, асинхронный режим, возбуждение.*

S. A. Grishanov
Senior Lecturer
Donetsk National Technical University

ANALYSIS OF THE GENERATOR MATHEMATICAL MODELS FOR ASSYNCHRONOUS REGIMES RESEARCH

The analysis of the generator mathematical models is given the main attention in the work. Models that take into account physical phenomena in the rotor array in the form of a complex multi-circuit substitution schemes are analyzed in the paper. Calculations of asynchronous regimes in the system for the case of excitation loss by the generator implemented. The conclusion is drawn that it is necessary to take into account in the generator model complex multi-circuit substitution schemes.

Keywords: *mathematical model, generator, multi-circuit substitution schemes, asynchronous regime, excitation.*

Введение и актуализация

В связи с продолжающейся реструктуризацией энергосистем постсоветского пространства важное значение приобретают режимы работы электрических систем, связанные с большими отклонениями угловой скорости роторов генераторов от синхронного значения. Все эти режимы, по разным причинам возникающие в энергосистеме, называются асинхронными.

Причины появления асинхронного режима отдельного генератора или части системы могут быть разные. Его может вызвать потеря возбуждения отдельного генератора, нарушение динамической устойчивости после резкого возмущения или нарушение статической устойчивости сильно перегруженной системы при малом возмущении [1]. В сложной системе могут быть случаи, когда асинхронный ход, возникший в одной части системы, может привести к выпадению из синхронизма какого-либо генератора или группы генераторов в другой части энергосистемы.

Для большинства синхронных машин асинхронный режим не представляет опасности. Турбогенераторы в асинхронном режиме могут развивать мощность, сравнимую с номинальной. При скольжении порядка десятых долей процента, при которых устанавливается асинхронный режим турбогенераторов, токи, как правило, не представляют опасности для машины [2]. Допустимость асинхронного режима может вызвать сомнения в связи с опасностью нарушения устойчивости остальной части системы, в которой мощный генератор или группа генераторов работают асинхронно. В этом режиме генератор потребляет из системы значительную реактивную мощность, что может приводить к снижению напряжения во всей системе, создавая опасность нарушения устойчивости других генераторов и узлов нагрузок.

В СССР был приобретен определенный опыт использования асинхронного режима как эффективного средства повышения надежности и живучести энергосистемы [1, 3]. В то же вре-

мя, если асинхронный режим недопустим по тем или иным условиям, в энергосистеме существует специализированная противоаварийная автоматика (АЛАР) для ликвидации этого режима. Как известно, для современной энергетики внедрение микропроцессорной техники, различных систем управления, а также развитие новых информационных технологий не является новизной. Поэтому усовершенствование методов, на базе которых будут построены те или иные устройства противоаварийной автоматики, является приоритетной задачей.

Следует также подчеркнуть, что наличие объектов с различными формами собственности в условиях государственной структурной перестройки, а также в условиях, когда имеет место дефицит энергоносителей и изношенности оборудования также требует пересмотра методики управления электрическими системами. В таких условиях возрастает влияние внешних факторов на мероприятия по управлению режимами электрических систем, растет количество задач «реального времени». Все это способствует актуализации задач, связанных с расчетами и анализом асинхронных режимов в электрических системах.

Общие положения

Как отмечалось ранее, нарушение динамической устойчивости может привести к возникновению асинхронного режима. Динамическая устойчивость синхронных генераторов в реальных электроэнергетических системах нарушается, как правило, достаточно быстро вслед за возмущением, где-то в течение 1–3 с. [1]. Поэтому расчеты переходных процессов, целью которых является анализ динамической устойчивости электрических систем, используют сравнительно простые математические модели. В этих моделях генератор описывается дифференциальным уравнением второго порядка, а вращающийся момент на его валу принимается неизменным. Частота в энергосистеме в течение всего переходного процесса считается неизменной. При анализе асинхронных режимов возникают подобные процессы, но более продолжительные по времени – до нескольких десятков секунд.

При математическом моделировании переходных процессов с вращающимися электрическими машинами переменного тока первым возникает вопрос о форме исходных уравнений. Уравнения могут быть взяты в исходной, не преобразованной форме (в фазных координатах), или могут быть преобразованы тем или иным способом [1]. От вида уравнений зависит не только количество необходимой информации, но и наглядность решений и даже иногда точность.

Наиболее универсальным преобразованием трехфазной системы координат является преобразование Парка к вращающимся координатам d и q. На основании этого преобразования в свое время были получены уравнения Парка – Горева [4]. Они пригодны и для синхронных, и для асинхронных машин, однако их преимущества особенно ярко проявляются при исследовании процессов машин, имеющих магнитную несимметрию ротора. При моделировании синхронных генераторов на основе уравнений Парка – Горева используют полученные экспериментально многоконтурные схемы машины по осям d и q.

Как отмечалось ранее, синхронная машина является важнейшим элементом электроэнергетической системы. Поведение синхронной машины существенно определяет характер электромеханических переходных процессов в энергосистеме [5]. Математическое моделирование синхронной машины имеет некоторые особенности, а именно возникает необходимость использования иерархически упорядоченного ряда моделей разного уровня точности с учетом изменения частоты в узле примыкания машины к системе. Общий метод построения иерархически упорядоченного ряда моделей заключается в составлении сначала наиболее полного для рассматриваемого класса процессов описания объекта и проведения его последовательных упрощений, позволяющих получить математические модели пониженной точности.

Цель работы

В работе далее предлагается рассмотреть различные по сложности математические модели синхронного генератора с оценкой их пригодности для моделирования и анализа асинхронных режимов и сопоставление расчетов с экспериментальными данными. На рис. 1 приведена схема исследуемой сети.

Результаты исследования

В работе выполнялись расчеты переходных режимов (асинхронного режима генератора, который выпал из синхронизма из-за потери возбуждения) с использованием математических моделей генератора различной сложности. Основной упор уделяется моделям, которые формируются на основе уравнений Парка – Горева.

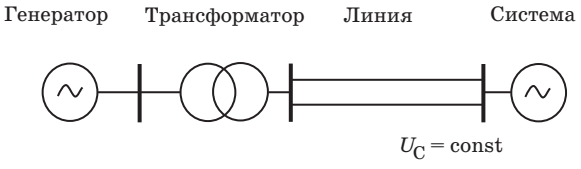


Рис. 1. Схема исследуемой системы

Рассмотрены следующие математические модели генератора:

– модель по полным уравнениям Парка – Горева с использованием многоконтурных схем замещения;

– модель по полным уравнениям Парка – Горева с использованием схем замещения с одним контуром;

– модель по полным уравнениям Парка – Горева с использованием схем замещения с одним контуром, параметры которого зависят от скольжения [6];

– упрощенная модель [7] (модель, в основу которой положены уравнения движения генератора при участии асинхронного момента, полученного по многоконтурной схеме замещения).

Для описания динамических свойств массивных элементов ротора генератора использовались две различные схемы замещения генератора при моделировании по полным уравнениям Парка – Горева – обычная схема замещения, а для упрощенной модели – схема замещения генератора с вынесенным контуром намагничивания [7]. Одно из основных отличий схемы замещения генератора с вынесенным контуром намагничивания заключается в необходимости учета внешнего сопротивления во всех параметрах схемы. Параметры эквивалентных многоконтурных схем замещения турбогенератора получены по экспериментальным частотным характеристикам для генераторов ТГВ-200 [8],ТВВ-200-2 [9] и ТВВ-320-2 [5].

Сравнительный анализ проводится на примере следующих генераторов: ТВВ-200-2 при мощности в исходном (доаварийном режиме) $P = 80$–152 МВт; ТГВ-200 при $P = 100$–124 МВТ, а также ТВВ-320-2 при $P = 165$–185 МВт с различными режимами работы ОВГ (короткозамкнутой или замкнутой на то или иное сопротивление самосинхронизации). Шунтирующие сопротивления 2,5–3,5-кратного значения применительно к активному сопротивлению обмотки ротора в горячем состоянии получили распространение для турбогенераторов вместе с внедрением автоматов гашения поля серии АГП, когда эти сопротивления перестали играть роль гасительных, имевших, как правило, пятикратное значение. Для турбогенераторов с косвенным охлаждением уменьшение сопротивления обеспечивало уменьшение скольжения и потерь в роторе [2].

В качестве опытных данных были приняты результаты испытаний турбогенератора ТГВ-200 на Бурштынской ГРЭС, приведенные в [10], а для генераторов ТВВ-200-2 и ТВВ-320-2 – экспериментальные данные асинхронного режима, приведенные в [2].

Сопоставительный анализ результатов расчета асинхронного режима выполнен в процентном соотношении. Результаты сопоставления приведены в табл. 1–3.

Анализ результатов расчета свидетельствует о том, что рост средней активной нагрузки в установившемся асинхронном режиме приводит к увеличению амплитуды переменной составляющей тока статора, реактивной и активной мощности и величины среднего за период скольжения. Колебания параметров зависят также от состояния ОВГ, это объясняется изменением несимметрии ротора. Из приведенных данных видно, что колебания скольжения и мощности существенно зависят от значения шунтирующего сопротивления, на которое замкнута ОВГ. Увеличение шунтирующего сопротивления до десятикратного значения позволяет уменьшить колебания скольжения и мощности практически до минимально возможного.

Как показывает анализ табл. 1–3, при идентичном характере изменения режимных параметров погрешности расчета составляют поряд-

Таблица 1

Результаты моделирования асинхронного режима генератора ТВВ-200

№ модели	Исходный режим	Состояние ОВГ	Параметры асинхронного режима (пределы колебаний)	
			P, о. е.	$I_{ст}$, о. е.
1	100 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	0,556÷0,4	0,916÷0,81
		$R_{cc} = 3 \cdot R_f$	0,548÷0,408	0,916÷0,8
		$R_{cc} = R_f$	0,789÷0,161	1,538÷0,712
	80 МВт	$R_{cc} = R_f$	0,565÷0,191	0,946÷0,616
	120 МВт	$R_{cc} = R_f$	0,932÷0,246	1,342÷0,763
	152 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	0,954÷0,487	1,45÷ 1,147
2	152 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	0,69÷ 0,684	1,063÷0,995
		$R_{cc} = R_f$	0,848÷0,552	1,467÷0,835
	100 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	0,446÷0,442	0,74÷ 0,695
4	80 МВт	$R_{cc} = R_f$	1,096÷0,908	0,638÷0,298
	152 МВт	$R_{cc} = R_f$	1,656÷0,427	1,194÷0,365
Опыт	152 МВт	$R_{cc} = R_f$	0,821÷0,509	1,385÷1,135

Окончание табл. 1

№ модели	Исходный режим	Состояние ОВГ	Параметры асинхронного режима (пределы колебаний)		
			I_f, о. е.	S, %	Q, о. е.
1	100 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	±0,19	0,81÷ 0,26	0,851÷ 0,710
		$R_{cc} = 3 \cdot R_f$	±0,226	0,77÷ 0,24	0,859÷ 0,703
		$R_{cc} = R_f$	±1,233	1,53÷ 0,63	1,416÷ 0,687
	80 МВт	$R_{cc} = R_f$	±0,550	0,770÷ 0,321	0,921÷ 0,570
	120 МВт	$R_{cc} = R_f$	±0,793	1,11÷ - 0,468	1,21÷ 0,658
	152 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	±0,334	1,69÷ 0,85	1,24÷ 1,01
2	152 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	±0,092	0,333÷0,267	0,867÷ 0,773
		$R_{cc} = R_f$	±0,677	0,703÷0,154	0,906÷ 0,421
	100 МВт	$R_{cc} = 3{,}5 \cdot R_f$	±0,068	0,186÷0,157	0,632÷ 0,554
4	80 МВт	$R_{cc} = R_f$	–	1,181÷0,062	–
	152 МВт	$R_{cc} = R_f$	–	1,739÷ -0,109	–
Опыт	152 МВт	$R_{cc} = R_f$	±0,280	1,296÷0,203	0,142÷0,091

Таблица 2

Результаты моделирования асинхронного режима генератора ТГВ-200

№ модели	Исходный режим	Состояние ОВГ	Параметры асинхронного режима (пределы колебаний)	
			P, о. е.	$I_{ст}$, о. е.
4	100 МВт	$R_{cc} = R_f$	1,125÷0,937	0,618÷0,334
1	100 МВт	$R_{cc} = 3 \cdot R_f$	0,99÷ -0,427	0,947÷0,907
		$R_{cc} = R_f$	0,507÷0,345	1,253÷0,444
	124 МВт	$R_{cc} = 7 \cdot R_f$	0,729÷0,417	1,302÷ 1,05
2	100 МВт	$R_{cc} = 7 \cdot R_f$	0,548÷ 0,535	0,889÷0,786
	124 МВт	$R_{cc} = R_f$	0,440÷ 0,431	0,8÷0,696
Опыт	124 МВт	$R_{cc} = 7 \cdot R_f$	0,494÷0,43	1,06÷0,9

Окончание табл. 2

№ модели	Исходный режим	Состояние ОВГ	Параметры асинхронного режима (пределы колебаний)		
			I_f, о. е.	S, %	Q, о. е.
4	100 МВт	$R_{cc} = R_f$	–	1,145÷0,048	–
1	100 МВт	$R_{cc} = 3 \cdot R_f$	0,184÷ -0,131	0,595÷0,354	0,835÷ -0,518
		$R_{cc} = R_f$	0,592÷ -0,328	0,828÷ 0,046	1,198÷ 0,239
	124 МВт	$R_{cc} = 7 \cdot R_f$	±0,168	1,414÷ 0,757	1,156÷ 0,979
2	100 МВт	$R_{cc} = 7 \cdot R_f$	±0,066	0,322÷0,231	0,734÷ 0,578
	124 МВт	$R_{cc} = R_f$	±0,09	0,262÷0,175	0,703÷ 0,547
Опыт	124 МВт	$R_{cc} = 7 \cdot R_f$	±0,196	–	–

Таблица 3

Результаты моделирования асинхронного режима генератора ТВВ-320

№ модели	Исходный режим	Состояние ОВГ	Параметры асинхронного режима (пределы колебаний)	
			P, о. е.	$I_{ст}$, о. е.
1	185 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	0,437÷0,187	0,907÷0,631
		$R_{cc} = R_f$	1,144÷0,063	1,479÷0,688
	165 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	0,886÷0,176	1,736÷0,868
2	185 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	0,517÷ 0,515	0,933÷0,917
		$R_{cc} = R_f$	0,516÷0,515	1,02÷ 0,510
	165 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	0,459÷ 0,457	0,85÷0,826
4	185 МВт	$R_{cc} = R_f$	0,843÷0,604	0,513÷0,339
3	185 МВт	$R_{cc} = R_f$	1,139÷ 0,07	1,39÷ 0,718

Окончание табл. 3

№ модели	Исходный режим	Состояние ОВГ	Параметры синхронного режима (пределы колебаний)		
			I_f, о. е.	S, %	Q, о. е.
1	185 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	±0,34	0,620÷ 0,173	0,906÷ 0,593
		$R_{cc} = R_f$	±0,859	1,30÷ 0,803	1,351÷ 0,654
	165 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	±0,165	1,84÷ 0,437	1,588÷ 0,831
2	185 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	±0,132	0,054÷0,049	0,805÷ 0,789
		$R_{cc} = R_f$	±0,236	0,062÷0,035	0,906÷ 0,281
	165 МВт	$R_{cc} = 5 \cdot R_f$	±0,01	0,045÷0,042	0,726÷ 0,7
4	185 МВт	$R_{cc} = R_f$	–	0,139÷0,032	–
3	185 МВт	$R_{cc} = R_f$	±0,843	1,531÷0,846	1,118÷ 0,672

ка 5–50% при сравнении с опытными данными. Это обусловлено неточным определением параметров ОВГ, которые получены при синтезе эквивалентных схем замещения по частотным характеристикам проводимости синхронных машин со стороны обмотки статора. А также не всегда можно точно определить величину базового тока $I_{бf}$, это связано с недостоверностью в токе I_{fxx}.

Увеличение погрешности моделирования в режимных параметрах обусловлено неточностями модели устройств АРС, а также тем, что не учитывается насыщение стали синхронной машины. Следует отметить, что насыщение стали синхронной машины оказывает сильное влияние на изменение режимных параметров во время переходного процесса при нагрузках $P = 0{,}4–0{,}6$ от $P_{ном}$.

Заключение

На основании выполненного сопоставительного анализа различных по сложности моделей генератора можно сделать вывод о целесообразности использования модели генератора с многоконтурными схемами замещения или одноконтурными, но переменным значением сопротивления контура для исследования динамических режимов в электрических системах (асинхронные режимы). Использование моделей с одноконтурными схемами замещения или более упрощенных моделей генератора нецелесообразно при оценке допустимости асинхронного режима турбогенератора. Это доказывается результатами расчета и сопоставления с данными натурных экспериментов. В то же время многие промышленные программы используют такие модели генератора и даже более упрощенные, в которых физические процессы в роторе учитываются введением демпферного коэффициента (классическая модель).

Библиографический список

1. *Венников В. А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш. шк, 1988.

2. *Коган Ф. Л.* Анормальные режимы мощных турбогенераторов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.

3. *Хачатуров А. А.* Несинхронное включение и ресинхронизация в энергосистемах. М.: Энергия, 1969.

4. *Соколов Н. И.* Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов. М.: Энергия, 1970. 400 с.

5. *Гришанов С. А., Заболотный И. П.* Анализ моделей турбогенераторов для исследования анормальных режимов работы // Вісник Кременчуцького державного політехнічного інституту. Кременчуг. № 3 (26). 2004 г.

6. *Постников И. М.* Проектирование электрических машин. К.: Гостехиздат, 1960.

7. *Заболотный И. П., Диа Ибрагим.* Разработка минимальной сложности математической модели генератора для анализа длительных переходных процессов в энергосистемах: сб. науч. тр. ДонГТУ. Электротехника и энергетика. Вып. 2. Донецк: ДонГТУ, 1998. С. 181–188.

8. *Казовский Е. Я., Рогозин Г. Г., Горин В. Я.* Исследование частотных характеристик турбогенераторов // Электротехника. 1975. № 1. С. 9–13.

9. *Сидельников В. А.* Влияние выбора параметров массивного ротора на переходные процессы электрических машин переменного тока. Исследование электромагнитных полей, параметров и потерь в мощных электрических машинах. М.–Л.: Наука, 1966. С. 147–156.

10. Технический отчет. Испытания турбогенератора ТГВ-200 ст. № 6 Бурштынской ГРЭС в асинхронном режиме. Львов, 1968.

УДК 621.314.222

***Д. В. Гуков*[1]**
доктор технических наук, профессор

***С. Д. Загуляев*[2]**
курсовой офицер-преподаватель факультета строительства военно-морских баз

***С. А. Новиков*[3]**
[1,2,3]Военный институт (инженерно-технический) федерального государственного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии Хрулева А. В.»

ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА ОТДЕЛЬНЫХ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

В статье приведены новые технические решения для измерения индуктивностей рассеяния магнитного потока отдельных обмоток трансформаторов.

Взаимное расположение обмоток оказывает влияние на распределение индуктивностей между обмотками. Распределение индуктивностей в свою очередь влияет на характеристики трансформаторов. Предлагается улучшить массогабаритные показатели, снизить потери за счет оптимального размещения обмоток.

Ключевые слова: *трансформатор, индуктивности рассеяния отдельных обмоток, концентрическое расположение обмоток, намагничивающий ток, потери в стали.*

***D. V. Gukov*[1]**
Dr. Sc., Tech., Professor

***S. D. Zagulyaev*[2]**
Course Officer Teacher of the Faculty of Building Naval Bases

***S. A. Novikov*[3]**
[1,2,3]Military Institute (Engineering) Federal State Military Educational Institution of Higher Professional Education "Military Academy of Material and Technical Supply Name of Army General Khruleva A. V."

THE INDUCTANCE OF MAGNETIC FLUX SCATTERING OF INDIVIDUAL WINDINGS OF A TRANSFORMER

The article presents new technical solutions for measuring the inductances of magnetic flux scattering of individual windings of transformers.

The mutual arrangement of the windings affects the distribution of inductances between windings. The distribution of the inductances in turn affects the characteristics of the transformers. It is proposed to improve the weight and dimensions, reduce losses due to the optimal placement of windings.

Keywords: *transformer, inductance of scattering of individual windings, concentric location of windings, magnetizing current, losses in steel.*

30 ноября 1876 года (дата получения патента Яблочковым Павлом Николаевичем) считается датой рождения первого трансформатора переменного тока. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки. С тех пор трансформаторы подробно исследованы, изучены, широко используются в электроэнергетике.

При описании физических процессов для выделения основных явлений вводят допущения. Так, при описании работы трансформатора обычно принято пренебрегать индуктивностями рассеяния и активными сопротивлениями обмоток. Это нормально с учетом малости этих величин.

В некоторых случаях индуктивностями рассеяния пренебрегать нельзя – в силовых трансформаторах они определяют токи короткого за-

мыкания, в сварочных трансформаторах обеспечивают крутопадающую внешнюю характеристику.

Несмотря на то что индуктивностями рассеяния часто пренебрегают, нельзя сказать, что они недостаточно исследованы. Так, классическая векторная диаграмма строится обязательно с учетом индуктивностей рассеяния магнитного потока и активных сопротивлений отдельных обмоток.

Индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмотки трансформатора, приведенные к одному числу витков, часто принимают равными и постоянными по величине. В ряде случаев это допустимо для инженерных расчетов, но в некоторых случаях это может существенно исказить параметры трансформатора.

Если определить суммарную индуктивность рассеяния и активное сопротивление обмоток трансформатора легко с помощью опыта холостого хода, то для измерения индуктивности рассеяния отдельных обмоток требуется создать специальные условия, как в опыте противовключения (рис. 1).

Для измерения и вычисления x_1 и x_2 используется метод противовключения (метод Роговского в 1909 г.), который состоит в следующем: если питать трансформатор с первичной и вторичной сторон такими напряжениями, что $\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$, то поток $\Phi_c = 0$ и $E_1 = E_1 = 0$.

Намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток при этом равны по значению и противоположны по знаку $F_1 = -F_2$, откуда и происходит название метода.

Если измерить U_1, U_2, I_1, I_2 и мощности P_1, P_2, то можно определить параметры

$$z_1 = \frac{U_1}{I_1}, z_2 = \frac{U_2}{I_2}, r_1 = \frac{P_1}{mI_2^2},$$

где m – число фаз.

И, наконец, сопротивления рассеяния

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}; x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}.$$

В связи с изложенным можно сказать, что в режиме противовключения существуют только магнитные поля рассеяния. Идея метода противовключения лежит в основе всех расчетных методов определения индуктивных сопротивлений рассеяния.

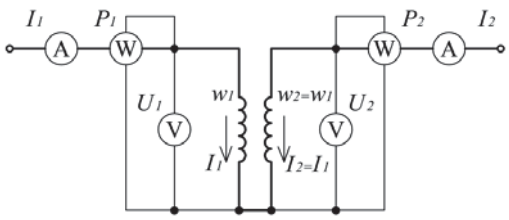


Рис. 1. Схема опыта противовключения

При $w_1 \neq w_1$ осуществление опыта Роговского практически невозможно, так как в магнитопроводе даже при небольшом нарушении условия $\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$ возникает заметный поток Φ_c, сравнимый с потоком в воздухе $\Phi_в$. Поэтому опыт проводят на макетах с $w_1 = w_1$ или при замене вторичной обмотки приведенной.

Сложность измерения индуктивностей рассеяния отдельных обмоток привела к тому, что поля рассеяния в трансформаторах – наименее изученный вопрос. Он сложен и в большинстве случаев оказывает малое влияние. Им чаще всего пренебрегают.

В настоящей статье ставится задача не разрешить полностью все существующие противоречия, связанные с полями рассеяния, а провести измерения индуктивностей рассеяния отдельных обмоток универсального однофазного трансформатора ОСМ мощностью 1,0 кВт для обмоток напряжением 220 В и 110 В (рис. 2). Причем обмотки концентрические и первичная обмотка (220 В) намотана ближе к магнитопроводу.

Перед измерением индуктивностей рассеяния сначала были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания:

Обмотки 220 В и 110 В (первичная и вторичная соответственно)

Опыт холостого хода:

$$U_1 = 204 \text{ В}, U_2 = 105 \text{ В}.$$

$$К_{тр} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{204}{105} = 1{,}9428, К_{тр}^2 = 3{,}774.$$

Опыт короткого замыкания:

$$I = 1{,}75 \text{ А}, U = 1{,}5 \text{ В}, Z = 0{,}85714 \text{ Ом}.$$

$$I_{ном} = \frac{1000}{220} = 4{,}54\,A,$$

$$U_{кз} = ZI_{ном} = 3{,}89 \text{ В}(1{,}7688\%).$$

Для измерения индуктивностей рассеяния отдельных обмоток была составлена схема (рис. 3).

Схема создает условия такие же, как при опыте противовключения. Путем подбора коэффициента трансформации был найден режим, соответствующий максимальному току в цепи и ми-

Рис. 2. Универсальный однофазный трансформатор ОСМ 1-1.0

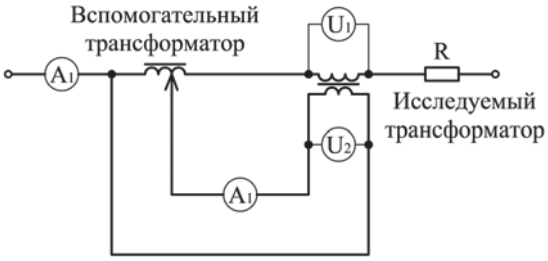


Рис. 3. Схема исследования

нимальному напряжению на первичной обмотке измеряемого трансформатора.

Особенностью измерений оказалась высокая чувствительность результатов измерения к внутреннему сопротивлению вольтметров. Поэтому вольтметр использовался электронный В3-38 с внутренним сопротивлением 4 Мом.

После настройки схемы (поиска коэффициента трансформации ЛАТра, соответствующего минимальному напряжению на первичной обмотке трансформатора) были произведены измерения напряжений на первичной и вторичной обмотках, затем сосчитаны полные сопротивления обмоток z_1 и z_2, а затем вычислены индуктивные сопротивления рассеяния отдельных обмоток.

Опыт (трансформатор – ЛАТР, измерение осциллографом):

Амплитуда U_{220}=1,2 В, U_{110}=0,4 В;

Ток I_1=1,75 А;

$$z_1 = \frac{1,2}{1,41 \cdot 1,75} = 0,486 \text{ Ом},$$

$$z_2 = \frac{0,4}{1,41 \cdot 1,75 \cdot 1,9428} = 0,083 \text{ Ом},$$

$$z_2' = z_2 \text{К}_{\text{тр}}^2 = 0,083 \cdot 3,774 = 0,314 \text{ Ом}.$$

Измерения активного сопротивления обмоток (мост постоянного тока).

220 В – 0,198 Ом,110 В – 0,07 Ом;

$$r_{220B} = 0,198 \text{ Ом}, \; r_{110B} = 0,07 \text{ Ом},$$

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_{220B}^2} = \sqrt{0,486^2 - 0,198^2} = 0,4438 \text{ Ом},$$

$$x_2' = \sqrt{z_2'^2 - r_{110B}^2} = \sqrt{0,314^2 - 0,07^2} = 0,3060 \text{ Ом},$$

$$\frac{x_1}{x_2'} = 1,45.$$

Как показал расчет, индуктивность обмотки, расположенной ближе к магнитопроводу, значительно превышает приведенную к одному числу витков индуктивность вторичной обмотки. Объяснения этому могут быть следующими: поток рассеяния отдельных обмоток замыкается прежде всего по магнитопроводу, и для первичной

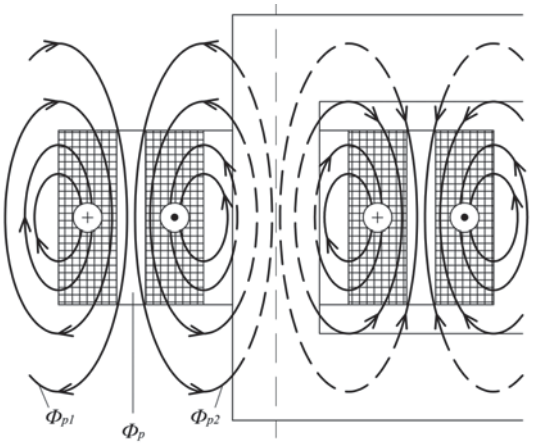


Рис. 4. Поля рассеяния отдельных обмоток трансформатора

обмотки (220 В), расположенной рядом с магнитопроводом, сопротивление магнитному потоку значительно меньше (рис. 4).

Эти данные получены для стандартного трансформатора. Если применить различные конструктивные меры для увеличения разницы индуктивностей рассеяния, то эту разницу можно еще больше увеличить.

Поиски в научной литературе подтвердили достоверность полученных результатов. Более того, в литературе описаны способы перераспределения индуктивностей отдельных обмоток без изменения их суммы.

По данным [1], индуктивность обмотки, расположенной ближе к магнитопроводу, выше на 9% (опытные данные) (рис. 5). Если разорвать магнитопровод, тем самым затруднив путь потоку рассеяния обмотки, удаленной от магнитопровода, большая часть потока рассеяния будет сосредоточена в обмотке, ближней к магнитопроводу.

Деление каждой обмотки пополам и расположение на разных стержнях приводит к следующему распределению потоков рассеяния (рис. 6). При этом индуктивность обмотки, удаленной от магнитопровода, почти в 3 раза больше. Причина – силовые линии охватывают полностью все витки обеих половинок обмотки (опытные данные).

Где это можно применить? При работе под номинальной нагрузкой в силовом трансформаторе ТМ-630кВА имеет место потеря напряжения на

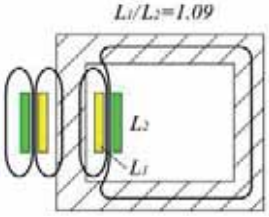


Рис. 5. Поток рассеяния обмотки, ближней к магнитопроводу

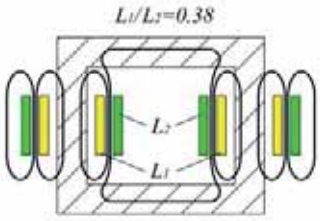


Рис. 6. Распределение потоков рассеяния при делении обмоток по двум стержням

индуктивности рассеяния и активном сопротивлении обмоток, равное напряжению короткого замыкания – 5,5%.

Если считать, что активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки равно приведенному к одному числу витков активному и индуктивному сопротивлению вторичной обмотки, то до намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора будет доходить сетевое напряжение за вычетом падения напряжения на первичной обмотке, то есть меньше примерно на 2,75%. Если добиться значительного преобладания сопротивления первичной обмотки, например, в 3 раза, то снижение напряжения можно довести до 4,125%. Таким образом, если использовать трансформатор только при номинальной нагрузке, сечение магнитопровода можно снизить на 4,125%. А если при 50%-й нагрузке, то в 2 раза.

График нагрузки ряда трансформаторов такой, что минимальная нагрузка не снижается меньше 40–60%, а это значит, сечение магнитопровода можно снизить примерно на 2%. В случае снижения загрузки возрастет намагничивающий ток, но его значения не будут соизмеримы с номинальным значением.

Почему это не используется производителями? Видимо из-за недостаточного внимания к индуктивностям рассеяния отдельных обмоток. У силовых трансформаторов принято размещать вторичную (низковольтную) обмотку ближе к магнитопроводу – так легче обеспечить изоляцию от магнитопровода. Такое размещение приводит к снижению индуктивности первичной обмотки и обратному эффекту.

Таким образом, предлагается поменять расположение обмоток силовых трансформаторов: ближе к магнитопроводу разместить первичную обмотку, это позволит у силовых трансформаторов с высоким заполнением графика нагрузки снизить сечение магнитопровода (для трансформатора ТМ-630 и 50%-й минимальной нагрузке примерно до 2%).

Учет полей рассеяния уже применен для трансформаторов с разнесенными обмотками, применяемых в источниках сварочного тока. Он позволил при работе трансформатора только под нагрузкой снизить сечение магнитопровода [2, 3] или выполнить магнитопровод с переменным, сниженным в области размещения вторичной обмотки сечением [4].

Выводы

1. Предложен и опробован новый способ измерения индуктивностей рассеяния отдельных обмоток трансформатора. Планируется подать заявку на получение Патента РФ.

2. Магнитные поля рассеяния отдельных обмоток замыкаются частично по магнитопроводу, частично по воздуху. При этом магнитопровод оказывает в сотни раз меньшее сопротивление магнитному потоку. В результате наибольшим индуктивным сопротивлением рассеяния обладает та обмотка трансформатора, которая расположена ближе к магнитопроводу.

3. Возможно практическое применение учета индуктивностей рассеяния отдельных обмоток. Падение напряжения на индуктивности рассеяния именно первичной обмотки снижает потребность в сечении магнитопровода. Наибольший эффект будет наблюдаться, если первичной обмотке обеспечить наибольшее значение индуктивности рассеяния.

Таким образом, если исключить режимы малых нагрузок, то трансформатор можно выполнить с уменьшенным сечением. Речь идет о нескольких процентах. Если сечение оставить прежним, то положительным эффектом будет снижение намагничивающего тока и сопутствующих ему потерь. Для получения конкретных рекомендаций по расположению обмоток трансформатора для получения преобладания индуктивности именно первичной обмотки, а также уточнения положительного эффекта требуются дальнейшие исследования.

Библиографический список

1. *Марквардт Е. Г.* О рассеянии обмоток трансформатора // Электричество. 1937. № 11. С. 60–63.

2. *Гуков Д. В., Перцев А. В.* Сварочный трансформатор с уменьшенным сечением магнитопровода // Электротехника. 1996. № 6. С. 22–25.

3. Пат. РФ № 2032506 МКИ В 23 К 9/00. Устройство для сварки // Д. В. Гуков, С. В. Гуков. Бюл. № 10 от 10.04.95.

4. Пат. РФ № 2121416 МКИ В 23 К 9/10, НО1 F 21/00. Устройство для сварки // Д. В. Гуков, А. А. Еруманс. Бюл. № 31 от 10.11.98.

УДК 621.313.5

А. Г. Долгих[1]
ассистент

В. М. Мартемьянов[2]
кандидат технических наук, доцент

В. Н. Бориков[3]
доктор технических наук, доцент
[1,2,3]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

АКТИВНЫЙ ЛЕНТОЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ МОМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье рассмотрены основные характеристики и закономерности работы ленточной намотки, предложено применение ее в моментном электродвигателе.

Ключевые слова: *ленточная намотка, вращающий момент, боковые вырезы, магнитное поле, температурный режим, численный эксперимент.*

A. G. Dolgih[1]
Assistant

V. M. Martemyanov[2]
PhD, Tech., Associate Professor

V. N. Borikov[3]
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
[1,2,3]*Tomsk Polytechnic University*

ACTIVE TAPE ELEMENT OF TORQUE MOTOR

The paper considers main characteristics and principles of the tape winding operation. It is suggested to apply the tape winding in the torque motor.

Keywords: *tape winding, torque, side cuts, magnetic field, numerical simulation.*

Благодаря своим преимуществам магнитоэлектрические моментные двигатели являются достаточно распространенными в системах автоматики. Однако не исключается вероятность, что традиционные конструктивные решения таких двигателей могут приблизиться к своему пределу, когда их характеристики практически нельзя будет существенно улучшать. В этом случае появится необходимость разработки новых конструктивных подходов.

Одним из шагов в этом направлении является предложение заменить традиционную обмотку ленточной намоткой [1]. Преимущества такого приема заключаются в новом конструкторско-технологическом подходе к разработке и изготовлению двигателя; возможности увеличения удельных характеристик в связи с хорошим теплоотводом; возможности создания желаемой характеристики «момент-угол поворота ротора».

Активный элемент такого двигателя – многослойная ленточная намотка – представляет собой совокупность последовательно соединенных пластин, по которым в диагональных направлениях протекает ток. Поперечные компоненты этого тока, взаимодействуя с магнитным полем полюсов ротора, создают вращающий момент. Длина a каждой пластины равна полюсному делению τ магнитной цепи двигателя. Диагональное протекание тока по каждой пластине обеспечивается боковыми вырезами в ленте, создаваемыми поочередно с каждой из сторон с шагом в полюсное деление [2].

Так как по пластинам протекает распределенный ток, то силу F, действующую на полюс ротора и зависящую от индукции B, толщины ленты Δ и двойного интеграла от плотности распределенного тока: $F = B\Delta\iint j(x,y)dxdy$ [3], определяем с помощью программного продукта COMSOL [4, 5].

В общем случае зависимость силы от взаимного расположения пластины и полюса ротора-магнита $F(x)$ имеет вид, представленный на рис. 1. Соответственно, так же будет отображаться и зависимость момента M от угла поворота ротора α.

Получающаяся зависимость $M(\alpha)$ во многих практических случаях неприемлема. Для реализации необходимой зависимости предлагается применять наряду с основными боковыми вырезами и дополнительные. Пример реализации приведен на рис. 2.

Особый практический интерес представляет случай, когда «треугольную» зависимость момента от угла можно реализовать с помощью двух дополнительных вырезов на каждой пластине (рис. 3, *б*). На рис. 3, *а* показана зависимость двойного интеграла $D(x)$, сомножителя в выражении для силы и, соответственно, момента.

В процессе численного моделирования выяснилось, что сопротивление единичной пластины зависит от соотношения ее длины и ширины. В случае вариации соотношения длины a и ширины b пластины ($\beta = b/a$) наблюдается некоторое минимальное значение сопротивления (рис. 4). Параметр $\beta_к = b_к/b$ представляет собой относительную ширину электрода, здесь $b_к$ –

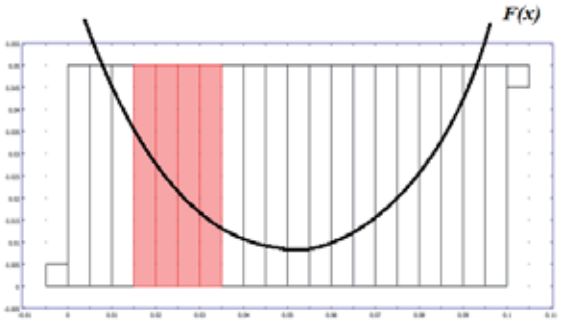


Рис. 1. Зависимость развиваемой силы от перемещения полюса

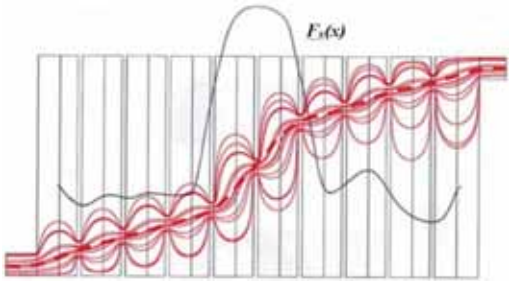
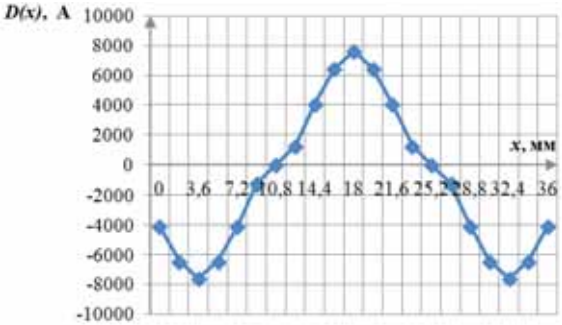


Рис. 2. Реализация необходимой зависимости с помощью дополнительных боковых вырезов

а)



б)

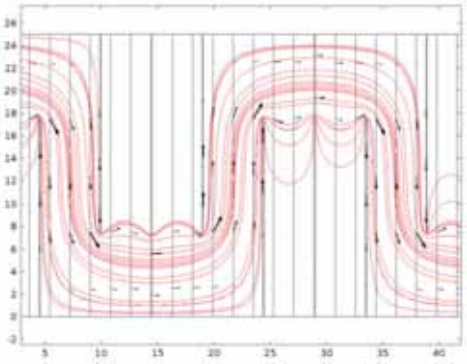


Рис. 3. «Треугольная» зависимость момента

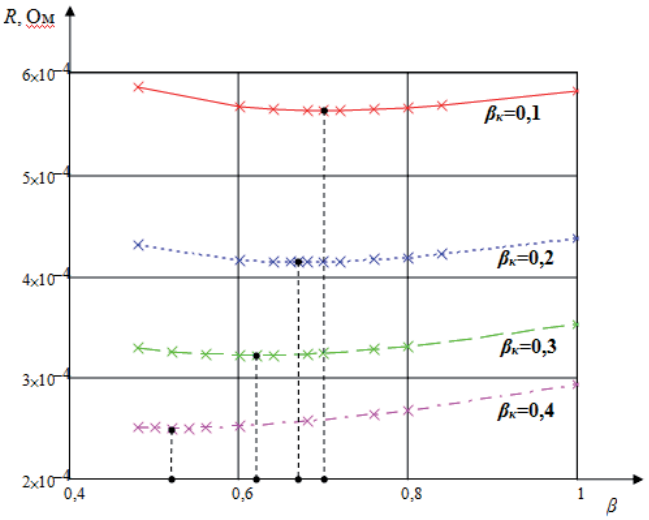


Рис. 4. Зависимость сопротивления пластины от соотношения ее ширины и длины

размер участка ленты, остающегося после выполнения выреза.

Проведем анализ влияния параметров намотки на момент двигателя. Предположим, что число витков намотки N небольшое, при этом геометрия пластин во всех слоях практически неизменна, т. е. неизменным будет и сопротивление R каждой пластины. Считаем также, что индукция магнитного потока, пронизывающего пластину, однородна; все пластины в пакете пронизываются потоком одинаково. Сила, действующая на одну пластину с током, как показано ранее, определяется как $F = \Delta \cdot B \cdot D(I_0, x_c)$. В дальнейшем для упрощения записей двойной интеграл $D(I_0, x_c)$, взятый по площади, ограниченной действием магнитного потока, центр которой определяется координатой x_c, будет обозначаться как D. Величина этого интеграла определяется при пропускании через пластину тока I_0. Ток, протекающий по намотке, зависит от напряжения питания U, активного сопротивления пластины R, числа пар полюсов p, числа витков намотки N, т. е: $I = U/(2p \cdot N \cdot R)$.

Так как сила определяется двойным интегралом D, зависящим линейно от тока, выражение для силы запишем в виде

$$F = \Delta \cdot B \cdot \frac{U}{2p \cdot N \cdot R \cdot I_0} \cdot D. \qquad (1)$$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов, которые создаются каждой пластиной всех слоев намотки. Средний радиус намотки определим как $r_{ср} = r_0 + (N \cdot \Delta)/2$, где r_0 – радиус гильзы, на которую наматывается лента.

В этом случае момент определится следующим образом:

$$M = 2p \cdot N \cdot F \cdot r_{ср} = \Delta \cdot B \cdot \frac{U}{R \cdot I_0} \cdot D \cdot \left(r_0 + \frac{N \cdot \Delta}{2} \right). \qquad (2)$$

Оценим влияние числа витков намотки на величину развиваемого момента. С одной стороны, увеличение числа пластин – активных элементов – должно увеличить момент, однако при этом во столько же раз увеличится полное сопротивление намотки и уменьшится ток. В этом отношении число витков на величину момента не влияет. Увеличение момента за счет увеличения среднего радиуса намотки незначительно. С другой стороны, меньшее число витков намотки приведет к уменьшению воздушного зазора магнитной цепи и увеличению индукции B. При определении минимального значения N необходимо исходить из возможностей как источника питания, так и теплостойкости намотки

$$N \geq \frac{U}{2p \cdot R \cdot I_{доп}}. \qquad (3)$$

Для определения числа пар полюсов магнитной цепи и, соответственно, параметров намотки, при которых наблюдается максимальный момент, введем понятие относительного момента

$$k_M = \frac{M_i}{M_1} = \frac{B_i}{B_1} \cdot \frac{R_1}{R_i} \cdot \frac{D_i}{D_1}. \qquad (4)$$

В данном случае M_1, B_1, R_1, D_1 – величины, характеризующие двигатель в случае одной пары полюсов $p = 1$; M_i, B_i, R_i, D_i – в случае, если число пар полюсов $p = i$.

В первую очередь будем учитывать только параметры, которыми характеризуется намотка – сопротивления пластин и двойные интегралы плотности распределенных токов. Для их определения в программном продукте COMSOL создавались модели намотки со средними радиусами, лежащими в диапазоне $r_{ср} = 0{,}025 \div 0{,}075$ м и с шириной ленты $b = 0{,}05$ м и $0{,}025$ м; материал ленты толщиной $\Delta = 10^{-4}$ м – медь.

Коэффициент полюсного перекрытия задавался равным $\alpha_п = 0{,}5$, положение центра полюса находилось в точке $x_c = 0{,}25 \cdot a_i$, где a – длина пластины, равная полюсному делению ($a = \tau$). Графики изменения отношения сопротивлений R_1/R_i, соответствующие случаю $r_{ср} = 0{,}027$ м и $b = 0{,}025$ м, приведены на рис. 5.

Для других рассмотренных вариантов намотки закономерности изменения соотношений сохраняются, и их максимумы находятся в диапазоне числа пар полюсов $p = 4 \div 6$. На графиках использовано обозначение относительной ширины электрода (контакта) $\beta_к = b_к/b$. Зависимости отношений расчетных величин двойных интегралов для варианта ленточной намотки с параметрами, приведенными выше, демонстрируются графиками рис. 6.

Как видно из представленных графиков, величина двойного интеграла D при вариации числа пар полюсов меняется незначительно, особенно при малых $\beta_к$. В итоге можно сделать вывод, что основное влияние на рост момента двигателя оказывает изменение активного сопротивления пластин намотки.

В связи с тем, что в данной работе задача определения оптимальных параметров магнитной цепи не стояла, в качестве основы для анализа

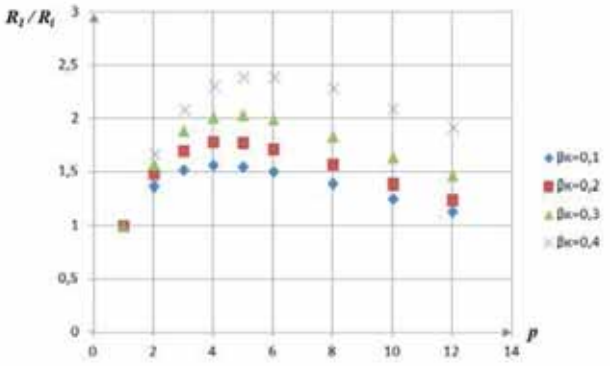


Рис. 5. Характер изменения относительных сопротивлений

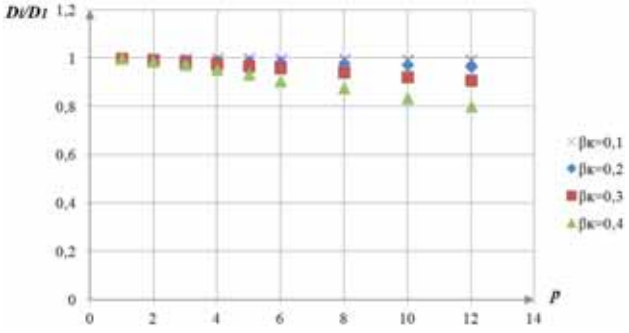


Рис. 6. Изменение относительных величин двойных интегралов

была выбрана модель, позволяющая проводить ее параметризацию по изменению числа пар полюсов и определение индукции в воздушном зазоре (рис. 7).

На рис. 8 приведена зависимость изменения индукции в воздушном зазоре исследуемой магнитной цепи. Величина воздушного зазора δ изменялась от 3 до 7 мм.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что максимум момента при выбранных геометрических параметрах модели намотки будет наблюдаться при числе пар полюсов в диапазоне от $p = 4$ до $p = 6$. Зависимость относительного момента $k_м(p)$ приведена на рис. 9.

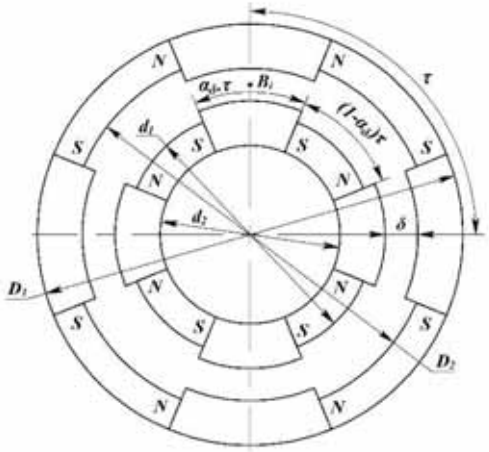


Рис. 7. Модель магнитной цепи моментного двигателя

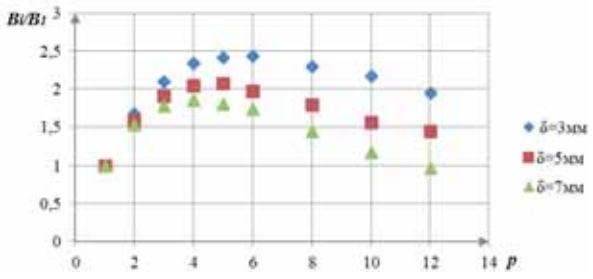


Рис. 8. Изменение магнитной индукции в зазоре при различном числе пар полюсов

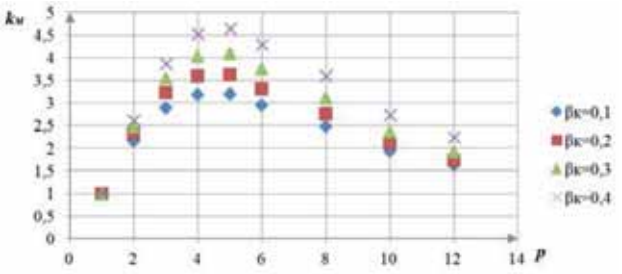


Рис. 9. Относительный момент при различном числе пар полюсов

Мощность, потребляемая двигателем из сети, определяется выражением $P = U^2/(2p \cdot R \cdot N)$. Аналогично предыдущим выкладкам введем понятие относительной потребляемой мощности:

$$k_p = \frac{P_i}{P_1} = \frac{R_1}{p \cdot R_i} = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{R_1}{R_i} \right).$$

Результаты расчетов для намотки с заданными ранее параметрами отражены семейством графиков на рис. 10.

На практике определенный интерес представляет такая характеристика моментного двигателя, как его статическая добротность $Q = M/(m \cdot P^{0,5})$ [6]. Была проведена оценка относительной статической добротности $k_Q(p)$ при учете допущения, что масса двигателя m при росте числа пар полюсов увеличивается незначительно. Результаты расчетов отражены семейством графиков на рис. 11.

Исходя из представленных результатов численного моделирования, можно сделать вывод, что при заданных геометрических параметрах намотки оптимальные параметры моментного двигателя будут наблюдаться при числе пар полюсов от $p = 4$ до $p = 6$.

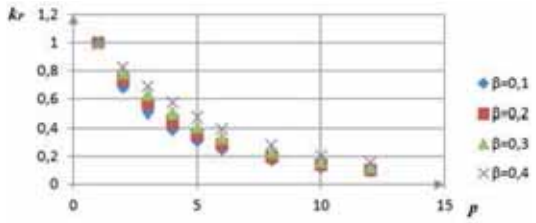


Рис. 10. Относительная мощность при различном числе пар полюсов

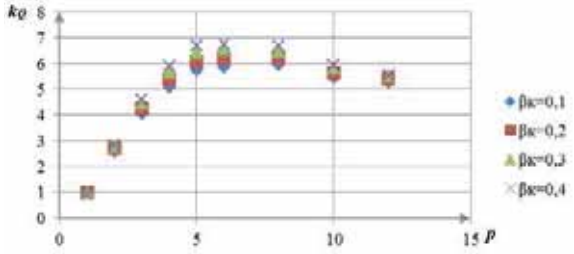


Рис. 11. Относительная статическая добротность

Несмотря на то что во многих источниках указывается практическое отсутствие влияния тока обмоток на магнитное поле, создаваемое высокоэрцитивными магнитами, для двигателя с ленточной намоткой это влияние может быть существенным. Все объясняется тем, что одним из свойств намотки является способность пропускать достаточно большие токи, которые, в свою очередь, создают магнитные поля, искажающие основной поток в рабочем зазоре. Численные эксперименты, проведенные в среде COMSOL, показывают, что в отсутствие внешнего источника магнитного поля при диагональном протекании распределенного тока через пакет пластин создается магнитное поле, характер распределения нормальных компонент индукции которого показан на рис. 12.

Кривые *1* и *2* показывают распределение индукции по ширине пластины у ее торцов, кривая *3* – по ее центру. Для оценки влияния тока пластины на основной поток в программном продукте COMSOL была создана модель ленточной структуры и магнитной цепи (рис. 13).

Магнитная цепь обеспечивает в зазоре индукцию 0,4 Тл, в намотке задавался полный ток до 2500 А (I = 100 А, N = 25 витков). Для определения момента в каждом из заданных положений полюса ротора рассчитывалась осевая компонента плотности тока путем интегрирования по объему намотки. Ряд результатов расчета приведены кривыми на графике (рис. 14).

Нижняя группа кривых относится к полному току 1250 А, верхняя – к 2500 А. Следует вывод, что под действием реакции тока намотки характеристика, связывающая развиваемый двигателем момент и угол поворота ротора, деформируется, а именно происходит вращение относительно ее центра. При реверсе тока поворот характеристики происходит в противоположном направлении.

Был проведен ряд температурных исследований. Основными источниками тепла, выделяемого при протекании тока, будут места сужения ленты, образованные вырезами. Однако указанные участки будут охлаждаться за счет оттока тепла в те зоны ленты, где плотность тока невысока, а поверхности охлаждения имеют достаточные размеры и хороший тепловой контакт с корпусом двигателя.

При проведении численных исследований тепловых характеристик пакетного элемента (фрагмента ленточной намотки) в COMSOL Multiphysics с использованием модуля Heat Transfer – Joule Heating был выбран сплошной пакет без разделения на слои. При этом считалось, что токовые линии отдельных пластин пакета не переходят из одного слоя в другой.

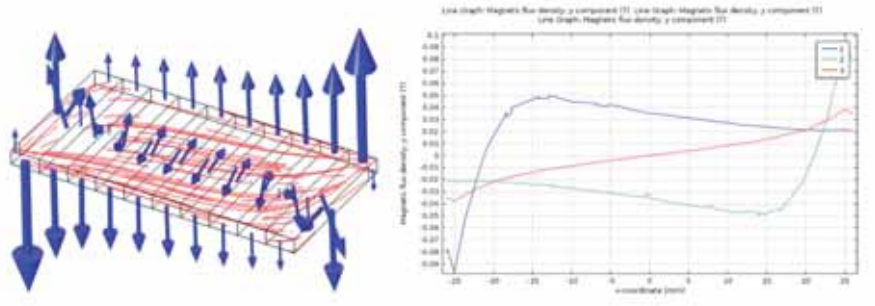


Рис. 12. Магнитное поле пакета пластин

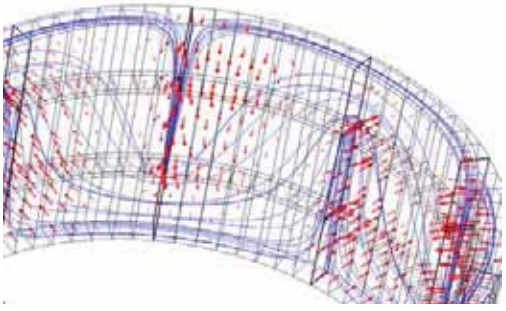


Рис. 13. Характер распределения индукции при протекании тока по намотке

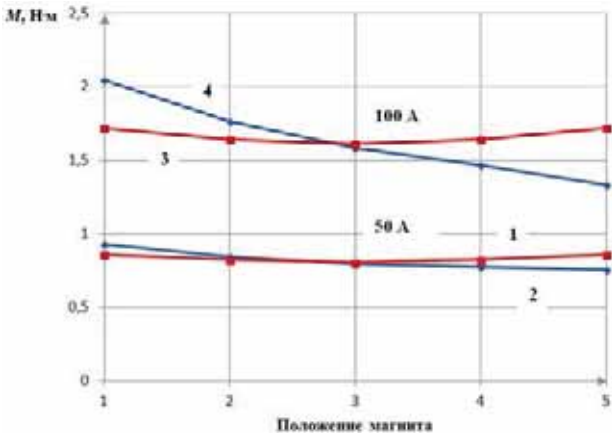


Рис. 14. Характер изменения момента при протекании тока по намотке

В процессе исследований рассматривались различные способы закрепления пакета, а соответственно, и варианты теплоотвода:

– пакет установлен на массивном теплоотводе;

– пакет закреплен на теплоотводе Т-образного сечения, масса которого равна массе массивного теплоотвода.

Представляет интерес закономерность распределения температуры по толщине пакета в наиболее его теплонапряженной зоне – в районе контакта (рис. 15).

На графиках рис. 16 кривой *1* представлен случай применения массивного теплоотвода, кривой *2* – теплоотвода с Т-образным сечением. Координата Δ отсчитывается вдоль толщины пакета от плоскости соприкосновения с теплоотводом. Следует заметить, что температура по окончании цикла протекания тока не превышает 80 °С, что, например, для импульсного режима работы такого двигателя не является серьезным препятствием.

Отдельный интерес представляет вопрос применения ленточной намотки в электромеханических устройствах. Ниже рассмотрены некоторые аспекты создания двухфазного вентильного двигателя. Для простоты пояснения рассмотрим моментный двигатель с одной парой полюсов и одновитковой намоткой (рис. 17).

На рис. 18 показана развертка намотки, которую рассматриваем изнутри; на этом рисунке полюса ротора расположены над пластинами П1 и П2, и направление силовых линий магнитного поля показано соответствующим образом рядом с обозначением полюсов *N* и *S*.

В результате взаимодействия магнитного поля полюсов с поперечными компонентами распределенного тока (на рисунке показаны их результирующие $I_п$ в области протекания магнитного потока) на полюсы ротора будут действовать силы *F*, создающие момент *M*. Под действием этого момента ротор будет вращаться в положительном направлении – против часовой стрелки. Указанный момент будет иметь положительное направление и ненулевую величину до того положения, когда центры полюсов будут совмещены с вырезами намотки. При этом магнитные потоки левых и правых половин полюсов будут взаимодействовать с равными, но имеющими противоположный знак величинами тока $I_п$. Если продолжать перемещать полюсы в том же направлении, то развиваемый момент изменит свой знак. В частности, если полюс *N* перейдет на пластину П2, а полюс *S* – на пластину П1, то момент начнет действовать по часовой стрелке (станет отрицательным). Если перейти к многополюсной конструкции, то можно указать, что действие всех полюсов ротора, в том числе противоположных полярностей, приводит к аналогичному эффекту и суммарный момент двигателя будет равен моменту, создаваемому взаимодействием с распределенным током пластины магнитного потока одного полюса, умноженного на число полюсов ротора. Вид зависимости развиваемого момента от положения центра одного из полюсов будет соответствовать характеру изменения силы, отображенному на рис. 1 – рис. 3. В дальнейшем будем полагать, что геометрия на-

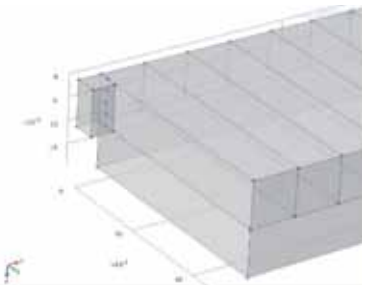


Рис. 15. Модель для определения теплового режима зоны электрического контакта

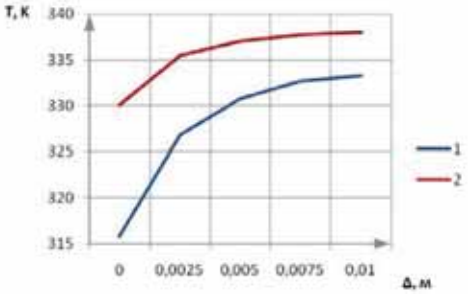


Рис. 16. Распределение температуры в зоне электрического контакта

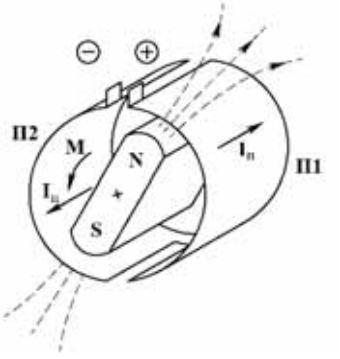


Рис. 17. Простейший моментный двигатель

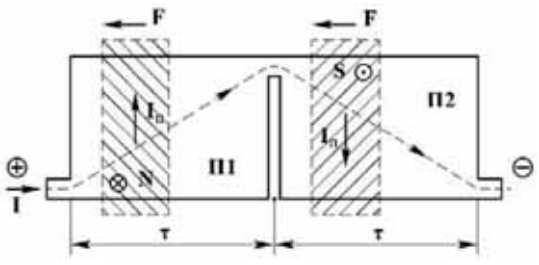


Рис. 18. Развертка одновитковой намотки

мотки и магнитной цепи обеспечивает зависимость, соответствующую «треугольной» форме характеристики (рис. 19, *а*), получение которой ранее пояснено на рис. 3. На рис. 19 координата α – угол поворота ротора.

Дальнейшее вращение ротора в заданном направлении будет возможным, если момент в любом положении ротора будет иметь один и тот же знак (рис. 19, *б*). Указанное возможно при изменении направления протекания по намотке тока посредством соответствующего переключения цепи питания по сигналу с датчика положения ротора ДПР (рис. 20). Переключение должно проводиться в момент, когда центры полюсов совмещаются с вырезами намотки. Предположим, что ДПР построен на основе индуктивного датчика и его ротор выполнен на основе диска из ферромагнитного материала соответствующей формы. Отметим, что направление диаметрального среза ротора совпадает с направлением, связывающим центры полюсов ротора двигателя. На рисунке введены обозначения: ЛН – ленточная намотка, КЭ – ключевой элемент.

При необходимости изменения направления вращения (знака создаваемого момента) протекание тока по намотке должно происходить в направлении, противоположном исходному. Это можно осуществить посредством блока реверса БР, в котором происходит инвертирование сигнала с ДПР.

Очевидно, что рассмотренная схема двигателя имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что вблизи вырезов ленточной намотки развиваемый момент близок к нулю. Выходом из положения является применение еще одной ленточной намотки, вырезы которой смещены относительно первой на половину полюсного деления [7]. В этом случае на характеристике результирующего момента точки с нулевым моментом будут отсутствовать. Отметим также важное обстоятельство, что если зависимости развиваемых моментов обеих намоток будут идентичными и представлять сочетание равнобедренных треугольников, то результирующий момент двигателя будет неизменным при всех положениях ротора; в идеале пульсации момента будут отсутствовать (рис. 21).

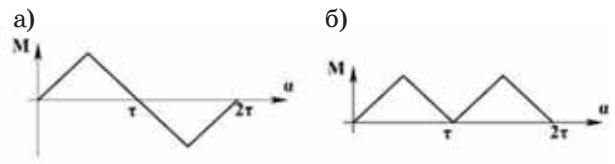


Рис. 19. Момент, развиваемый двигателем

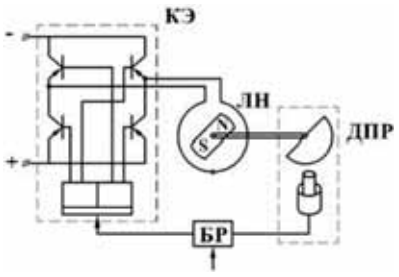


Рис. 20. Применение датчика положения ротора для переключения цепи питания

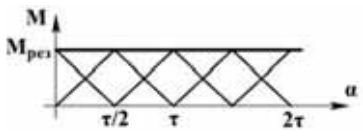


Рис. 21. Момент вентильного двигателя

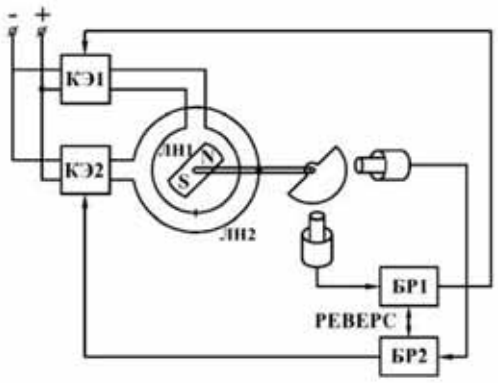


Рис. 22. Схема вентильного двигателя

Вторая намотка, соосная с первой и находящаяся под действием одного и того же магнитного потока ротора, может быть расположена рядом в осевом направлении, выполняться при одновременном наматывании двух лент либо быть размещена концентрически, охватывая первую. Схема такого двигателя приведена на рис. 22, где обозначения элементов соответствуют аналогичным, показанным на рис. 18.

В настоящее время проводятся численные эксперименты по исследованию пульсаций момента при протекании токов разной величины по совокупности двух намоток.

Библиографический список

1. Пат. России № 2441310. Моментный двигатель // *В. М. Мартемьянов, А. Г. Долгих* (*Иванова*). 2012. Бюл. № 3.

2. *Мартемьянов В. М., Долгих* (*Иванова*) *А. Г.* Активный элемент моментного двигателя // Контроль. Диагностика. Специальный выпуск. 2011. С. 109–111.

3. *Долгих* (*Иванова*) *А. Г., Мартемьянов В. М., Плотникова И. В.* Влияние геометрии пластины на силовую характеристику двигателя с активным пакетным элементом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 4. С. 22–26.

4. *Dolgih* (*Ivanova*) *A. G.*, *Martemjanov V. M.* Executive Unit with an Active Tape Element for Management System // 2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON): proc. (Krasnoyarsk, Sept. 12–13, 2013). Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. P. 1–3.

5. *Dolgih A. G.*, *Martemyanov V. M.*, *Samodurov I. N.* Analytical Studies of Torque Motor Tape Active Element // MATEC Web of Conf. Les Ulis, 2016. Vol. 48: Space Engineering. 7 p. [Электронный ресурс]. URL: http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20164801004.

6. *Демагин А. В.* Электрические машины для непосредственного привода приборных систем. СПб.: Научн.-произв. объединение «Азимут», 1991. 81 с.

7. Пат. России № 2454776. Вентильный двигатель // *В. М. Мартемьянов*, *А. Г. Долгих* (*Иванова*). 2012. Бюл. № 18.

УДК 621.311.1

А. В. Дробов
аспирант
Белорусский государственный университет транспорта

РАЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Для электрических сетей железнодорожных узлов дистанций электроснабжения разработан метод автоматического поиска рационального варианта электрических связей между трансформаторными подстанциями и распределительными устройствами с наименьшими приведенными затратами. Изменение схем питания узлов с целью их оптимизации позволяет снизить потери энергии без дополнительных затрат на модернизацию сети.

Ключевые слова: *схема электроснабжения, снижение потерь, метод случайного поиска.*

A. V. Drobov
PhD Student
Belarusian State University of Transport

RATIONAL SCHEMES OF ELECTRICAL SUPPLY OF INDUSTRIAL AND TRANSPORT OBJECTS

For electric networks of railway nodes of power supply distances, a method of automatic search of a rational variant of electric connections between transformer substations and distribution devices with the least reduced costs has been developed. Changing the power schemes of the nodes in order to optimize them allows to reduce energy losses without additional costs for network modernization.

Keywords: *electricity supply scheme, loss reduction, random search method.*

Электроэнергия является единственным видом продукции, транспортировка которой осуществляется за счет расхода определенной части самой продукции, поэтому потери энергии при ее передаче неизбежны. Задача состоит в определении их оптимального уровня и поддержании фактических потерь на этом уровне. Снижение потерь в электрических сетях наиболее важная, а для электроснабжающих организаций – единственная возможность уменьшить реальный расход электроэнергии [1, 2].

Обоснованность внедрения технических мероприятий по снижению потерь электрической энергии (МПС), которые требуют дополнительных капиталовложений, должна быть подтверждена технико-экономическими расчетами. Методика выбора оптимального варианта МПС, которая разрабатывается в настоящей работе, может быть сформулирована следующим образом.

Найти $\min\ Э = f_1(К, Т, S)$ при ограничениях:

$$Т \supset Т_{доп}; \quad (1)$$

$$S_{\sum} \supset S_{доп}; \quad (2)$$

$$К \geq 0, \quad (3)$$

где Э – приведенные затраты на МПС;

Т – множество рассматриваемых технических решений;

$Т_{доп}$ – множество допускаемых технических решений;

$S_{\sum}$ – суммарные расчетные полные мощности технических устройств;

$S_{доп}$ – допускаемые нагрузки питающих центров;

К – капитальные затраты на внедрение МПС.

Поставленная таким образом задача является типичной задачей математического программирования и может быть решена одним из методов поиска экстремальных значений целевой функции. Одним из таких методов может быть метод случайного поиска.

В каждом конкретном случае вид целевой функции, а также ограничивающих устройств определяется характером задачи. Так, например, при определении оптимальных мест размыкания в цепях электроснабжения узлов в терминах математического программирования

задача может быть сформулирована следующим образом.

Найти

$$\min W = f(A_i, К, Э) \quad (5)$$

при ограничениях:

$$\sum S_m \rangle \sum S_n, \quad (6)$$

$$S_{mk} \geq \sum S_{ne}, \quad (7)$$

$$U_{\min} \leq U_e \leq U_{\max}, \quad (8)$$

$$R_с \rangle \sum R_{доп}, \quad (9)$$

$$I_{кз} \rangle \sum I_{кз\ доп}, \quad (10)$$

где S_m – установленная мощность m-го источника питания;

S_n – установленная мощность n-го потребителя;

U_e – напряжение на потребителе с номером e;

$R_с$ – надежность системы;

$R_{доп}$ – допустимый для данной системы уровень надежности;

$I_{кз\ доп}$ – допустимый для принятых узлов оборудования ток короткого замыкания.

В выражении (1) W – целевая функция, представляющая собой приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию системы электроснабжения данного промышленного объекта, A_i – матрица инциденций принципиальной схемы соединений источников питания и потребителей; К – капитальные затраты на сооружение элементов энергетической системы, которые незначительно зависят от структуры A_i; Э – эксплуатационные расходы на содержание системы.

Требование $\sum S_m \rangle \sum S_n$ – тривиально, оно обозначает, что суммарной мощности источников питания достаточно для удовлетворения потребностей всех потребителей.

Зависимость $S_{mk} \geq \sum S_{ne}$ показывает, что мощность всех потребителей, подсоединенных к источнику m_k, не должна превышать номинальной мощности источника питания.

При выборе рациональных схем на их структуры могут накладываться дополнительные ограничения.

1. Структуры схем.

1.1. Способы соединения источников питания и потребителей. В схеме нет электрических соединений между источниками питания, их также нет и между потребителями. В этом случае схема распадется на ряд изолированных подсхем, не имеющих между собой электрической связи. (Далее разомкнутая схема.)

1.2. В схеме возможны связи между отдельными потребителями. Связи между источниками отсутствуют. В цепях с такими схемами соединения возможны контуры, в которые входят различные источники питания. В этом случае возникает необходимость в проверке наличия в этих контурах уравнительных («транзитных токов»).

1.3. Цепи, в которых возможны связи как между источниками питания, так и между потребителями. Это наиболее обобщенный вариант. Такая схема характерна для крупных энергетических систем.

2. Порядок определения структуры схемы с разомкнутыми цепями и источников питания и потребителей.

Возможны два варианта распределения мощностей между источниками питания.

В первом случае мощность каждого источника ограниченна. От него может получать питание только некоторая часть потребителей. Количество источников питания ограниченно. Место расположения ограниченно.

Во втором варианте мощность каждого источника питания равна или больше суммарной мощности потребителей. Число источников питания и их место расположения на плане участка электроснабжения не определено.

В результате исследований существующих схем некоторых узлов Белорусской железной дороги были получены все необходимые сведения о конфигурации питающих цепей, параметрах кабелей, а также о расходах активной и реактивной энергии. Методом сплошного перебора для Могилевского узла Белорусской железной дороги была определена схема питания потребителей, которая обеспечивает снижение мощности потерь в линиях 6–10 кВ на 20%, что превышает 0,5% от потребляемой электроэнергии. При этом выбор оптимального расположения средств компенсации реактивной энергии не производился.

Библиографический список

1. *Железко Ю. С.* Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практ. расчетов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.

2. *Крюков А. В.* Электрические сети районов электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта: учеб. пособие. Иркутск: ИрГУПС, 2008. 55 с.

УДК 621.311

А. В. Дробов
аспирант
Белорусский государственный университет транспорта

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НЕТЯГОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Разработана программа имитационного моделирования узлов, определяется N' наиболее эффективных вариантов организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта с наименьшими приведенными затратами на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями, а также имитационного моделирования линий продольного электроснабжения, которая позволяет найти вариант организации электроснабжения с наименьшей величиной технологического расхода электроэнергии с помощью метода статистических испытаний на основании рационального подбора оборудования.

Ключевые слова: *имитационная модель, система электроснабжения, линия продольного электроснабжения, надежность электроснабжения.*

A. V. Drobov
PhD Student
Belarusian State University of Transport

INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY ELECTRIC EQUIPMENT FOR NON-TANGIBLE RAILWAY CONSUMERS

The program for simulation simulation of nodes is determined by N 'the most effective options for organizing electricity supply to non-traction rail transport consumers with the least reduced costs based on the matrix of possible electrical connections between transformer substations, as well as simulating longitudinal power supply lines which allows us to find an option for organizing power supply with the lowest amount of technological power consumption Using the method of statistical tests based on rational selection of equipment.

Keywords: *imitation model, power supply system, longitudinal power supply lines, reliability of power supply.*

Разработка энергосберегающих устройств и технологий на железнодорожном транспорте, которой посвящена данная работа, в настоящее время является весьма актуальной. Оптимальное использование топливно-энергетических ресурсов на предприятиях Белорусской железной дороги входит в комплекс наиболее актуальных задач, решение которых обеспечит энергетическую стабильность, экологическую безопасность и улучшит экономическую ситуацию железнодорожного транспорта.

На дороге большое внимание уделяется повышению энергоэффективности всех без исключения процессов генерации, передачи и потребления тепловой и электрической энергии. Однако рациональные подходы при передаче и распределении электроэнергии в собственных сетях железной дороги до сих пор не сформированы, т. е. не разработаны основные направления по снижению потерь энергии в электросетях.

С учетом сложности проблемы ее решение целесообразно рассматривать как систему задач, поэтапно уточняющих и детализирующих решения по развитию систем электроснабжения. Достижение указанных задач невозможно без применения современных информационных технологий, что, в свою очередь, требует создания эффективных математических моделей и методов.

Разработка таких моделей и методов является сложной научно-технической проблемой, так как при учете электромагнитных процессов система нетягового электроснабжения железной дороги переменного тока представляет собой многомерный нелинейный динамический объект.

Ввиду большой размерности, сложности и недостаточной информационной обеспеченности практическое использование динамических моделей систем нетягового электроснабжения на современном этапе не представляется возможным. Поэтому для определения наиболее эффективных вариантов систем электроснабжения применяют имитационное моделирование.

Целью имитационного моделирования (ИМ) является определение варианта организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта с наименьшими приведенными затратами с помощью метода статистических испытаний или метода Монте-Карло на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями. Для N' наиболее эффективных вариантов организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта рассчитывается вероятность безотказной работы. Затем на основании весовых коэффициентов определяется вариант с наименьшими приведенными затратами и наивысшей вероятностью безотказной работы. Также в целевую функцию входит определение варианта организации электроснабжения с наименьшей величиной ТРЭТ.

1. Имитационная модель электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта.

Алгоритм ИМ электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта (ИМ УЗЛОВ) основан на поиске варианта организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта с наименьшими приведенными затратами с помощью метода статистических испытаний на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями. ИМ УЗЛОВ реализовано в виде web-приложения, которое не требует установки на компьютер заказчика объемного программного обеспечения, обновление происходит автоматически, обеспечивается высокая мобильность везде, где есть доступ в Интернет.

Алгоритм ИМ узлов предписывает выполнить следующие действия:

1. Внесение исходных данных:

– координаты точек расположения источника питания (ИП), распределительные устройства трансформаторных подстанций (РУ) и трансформаторные подстанции (ТП) (x_i, y_i, $i=\overline{1,n}$);

– сведения о всех ТП: номер или название ТП; $P_{\text{р}}$ – расчетная активная нагрузка потребителя; $\cos\varphi_{\text{р}}$ – расчетный коэффициент мощности; категории потребителей; $T_{\text{м}}$ – число часов использования максимума нагрузки в год; $U_{\text{ном}}$ – напряжение первичной обмотки трансформаторов; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы графика нагрузки участка сети. По умолчанию программа продолжает названия ТП, присваивая $i+1$ подстанции $i+1$ номер, при этом возможно редактирование [1].

Также реализован расчет для существующей сети, не предполагающий капитальные затраты на сооружение сети (К = 0).

Выполняется визуализация расположения ИП и ТП с нанесением координатной сетки, масштабирование координатной сетки до размера окна программы и указание соответствующих текстовых подписей, также выполняется масштабирование изображения ИП, РУ и ТП.

2. Имитационная модель электросетей продольного электроснабжения и линий автоматической блокировки железнодорожных участков.

Алгоритм имитационного моделирования (ИМ) сетей продольного электроснабжения и линий автоматической блокировки железнодорожных участков (ПЭ) основан на поиске варианта организации электроснабжения с наименьшим технологическим расходом электроэнергии на ее транспортировку (ТРЭТ) с помощью метода статистических испытаний на основании рационального подбора электрооборудования.

Результаты ИМ ПЭ являются исходными данными, в частности, для правильного выбора головных трансформаторов на трансформаторных подстанциях линий продольного электроснабжения и автоматической блокировки. ИМ ПЭ реализовано на объектно-ориентированном языке программирования Delphi.

3. Имитационная модель оценки параметров надежности электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта.

Имитационная модель оценки параметров надежности электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта (ИМ НАДЕЖН) позволяет оценивать вероятность безотказной работы всей системы на основании данных об интенсивностях отказов электрооборудования. Данная программа позволяет рассчитать вероятность безотказной работы ИМ ПЭ и N' наиболее эффективных вариантов ИМ УЗЛОВ. На основании полученной информации выявляются наиболее «узкие места» в различных вариантах схем электроснабжения, разрабатываются мероприятия по повышению надежности электроснабжения.

С помощью разработанной программы ИМ УЗЛОВ определяется N' наиболее эффективных вариантов организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта с наименьшими приведенными затратами на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями.

ИМ ПЭ позволяет найти вариант организации электроснабжения с наименьшей величиной ТРЭТ с помощью метода статистических испытаний на основании рационального подбо-

ра оборудования. ИМ ПЭ используется для правильного выбора трансформаторов, кабельных или воздушных линий для ИМ УЗЛОВ.

ИМ НАДЕЖН позволяет оценивать вероятность безотказной работы всей системы на основании данных об интенсивности отказов оборудования. Данная программа позволяет рассчитать вероятность безотказной работы ИМ ПЭ и N' наиболее эффективных вариантов ИМ УЗЛОВ. На основании полученной информации выявляются наиболее «узкие места» в различных вариантах схем электроснабжения, разрабатываются мероприятия по повышению надежности электроснабжения.

Результаты ИМ УЗЛОВ, ИМ ПЭ и ИМ НАДЕЖН являются исходной информацией для оценки наиболее эффективных решений с использованием весовых коэффициентов важности.

Библиографический список

1. *Дробов А. В.* Результаты программы имитационного моделирования нетяговой системы электроснабжения Витебской и Барановичской дистанции электроснабжения // Агротехника и энергообеспечение. 2016. Т. 1. № 4 (13). С. 76–83.

УДК 62-83:621.314:621.382

***А. А. Ефимов*[1]**
доктор технических наук, профессор

***С. Ю. Мельников*[2]**
кандидат технических наук, доцент
[1,2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ОДНОФАЗНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ ТОКА

Для активного однофазного мостового выпрямителя тока разработана функциональная схема системы автоматического регулирования с разрывным управлением в скользящем режиме. В соответствии с ней был разработан алгоритм релейного управления выпрямителем, проведен синтез регуляторов системы. Для рассматриваемой системы была создана в среде MATLAB/Simulink моделирующая программа, позволяющая анализировать динамические и энергетические показатели работы активного выпрямителя тока. Представлены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: *активный выпрямитель тока, алгоритмы управления, релейное управление, скользящие режимы, математическое моделирование.*

***A. A. Efimov*[1]**
Dr. Sc., Tech., Professor

***S. Yu. Melnikov*[2]**
PhD, Tech., Assistant Professor
[1,2]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ACTIVE SINGLE-PHASE CURRENT CONVERTER CONTROL

For active single-phase bridge current rectifier designed a functional diagram of the automatic control system with a discontinuous control in sliding mode. According to her the algorithm relay control of the rectifier has been developed, synthesis regulators for system is carried out. For the considered system the modeling program allowing to analyze dynamic and power indicators of operation for the active current rectifier has been created in the environment of MATLAB/Simulink. Results of mathematical modeling are presented.

Keywords: *active current rectifier, control algorithms, relay control, sliding modes, mathematical modeling.*

Совершенствование силовых полупроводниковых приборов, появление полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей с односторонней проводимостью возрождают интерес к схемам двухзвенных преобразователей частоты (ДПЧ), выполненных на базе активного выпрямителя тока (АВТ) и автономного инвертора тока (АИТ), которые являются гораздо менее исследованными по сравнению с активными ДПЧ на базе преобразователей напряжения [1–6].

На начальном этапе развития преобразовательной техники именно схема автономного тиристорного инвертора с прямой коммутацией послужила основой построения уникального класса стабилизированных преобразователей частоты с синусоидальным выходным напряжением. Эти преобразователи широко используются в системах электроснабжения разделительных производств, обеспечивающих получение изотопов тяжелых веществ, а также при создании систем бесперебойного электропитания [7–9].

Новейшая элементная база силовой электроники, наличие специализированных сигнальных микроконтроллеров, способных реализовать в реальном времени сложные импульсно-модуляционные и релейные алгоритмы управления простейшими силовыми схемами активных токовых преобразователей с целью повышения их энергетических показателей и улучшения динамических характеристик, ставят на повестку дня задачу развития и совершенствования активных токовых ДПЧ с синусоидальным выходным напряжением, изыскание возможностей их использования. Они используются в традицион-

ных областях применения (центрифужные системы электроснабжения разделительных производств, системы гарантированного электропитания), а также в системах общепромышленного регулируемого электропривода переменного тока и генерирования электрической энергии (СГЭЭ) автономных объектов.

Традиционно СГЭЭ летательных аппаратов разрабатываются с использованием в качестве первичного источника электрической энергии магнитоэлектрического генератора и полупроводникового преобразователя энергии, который, как правило, выполняется на базе преобразователей напряжения. Схемы этих преобразователей чрезвычайно разнообразны [10–12], зависят от вида бортовых систем электроснабжения летательных аппаратов (постоянного или переменного тока). В последнее время они выполняются обычно транзисторными с микропроцессорными системами контроля, диагностики и управления. Если на летательном аппарате проектируется сеть постоянного тока, то в качестве полупроводникового преобразователя рекомендуют использовать схему активного преобразователя напряжения (АПН), способного работать как в режиме активного выпрямителя, так и сетевого инвертора. Если выполняется система электроснабжения переменного трехфазного напряжения 115/200 В постоянной частоты 400 Гц, то в качестве полупроводникового преобразователя используется активный трехфазный ДПЧ с синусоидальным выходным напряжением, с входным преобразователем в звене формирования постоянного напряжения, также, как правило, выполненным по схеме АПН. Недостатками подобной СГЭЭ являются ее невысокая надежность, вызванная наличием электролитического конденсатора в звене постоянного тока, имеющего, кроме того, ограничение по допустимой отрицательной температуре, тяжелые аварийные режимы в случае выхода транзисторов из строя, высокие перенапряжения в преобразователях, а также высокий уровень электромагнитных помех.

В работе [13] в качестве полупроводниковых преобразователей автономных СГЭЭ летательных аппаратов предлагается использовать схемы токовых преобразователей. Действительно, такие преобразователи имеют ряд существенных преимуществ.

Преимущества токовых ДПЧ заключаются в повышенной надежности благодаря более надежному индуктивному фильтру в звене постоянного тока, работе преобразователя в режиме источника тока, обеспечивающего защиту от коротких замыканий и возможности работы при колебаниях входного напряжения питания. Технические требования к СГЭЭ летательных аппаратов обязательно содержат требование, согласно которому СГЭЭ должна обеспечить трехкратный по отношению к номинальному ток короткого замыкания в целях надежного срабатывания предохранителей. Этому требованию токовые преобразователи отвечают лучше, чем другие. Рассмотренный в [13] трехфазный АВТ был снабжен векторной системой подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами, в которой управление ключами преобразователя осуществлялось методом синусоидальной ШИМ, что неизбежно привело к низким динамическим показателям его работы.

Результаты анализа и синтеза векторных систем автоматического регулирования (САР) с использованием алгоритмов синусоидальной и векторной ШИМ для активных преобразователей тока представлены в работах автора [14, 15]. В них была подтверждена возможность формирования качественной формы сетевого тока, регулирования входных коэффициентов сдвига и мощности с реализацией режима рекуперации энергии в сеть переменного тока.

Однако из-за высокой добротности сетевого LC-фильтра приходилось существенно усложнять САР за счет введения демпфирующих связей по производным сетевых токов для устранения этих колебаний. Было установлено, что наиболее перспективными системами регулирования являются системы разрывного управления, работающие в скользящем режиме, и системы прогнозирующего релейно-векторного (ПРВ) управления [1–6]. Первые позволяют обеспечить максимальное быстродействие систем регулирования, инвариантность к возмущающим воздействиям и к вариации динамических свойств объекта управления. Вторые сочетают в себе положительные качества векторных и разрывных систем управления.

Однако для рассматриваемой в работе схемы активного однофазного выпрямителя тока, силовая часть которого представлена на рис. 1, ПРВ управление не рационально, т. к. число состояний двух силовых ключей, включенных одновременно, в однофазной схеме всего четыре, в то время как в трехфазной схеме – девять. В трехфазной схеме при реализации ПРВ управления возможно осуществить оптимальный выбор состояний ключей в результате прямого либо обратного прогноза.

В однофазной схеме АВТ ПРВ управление вырождается в релейное управление. При этом наиболее просто реализуется симметричный ре-

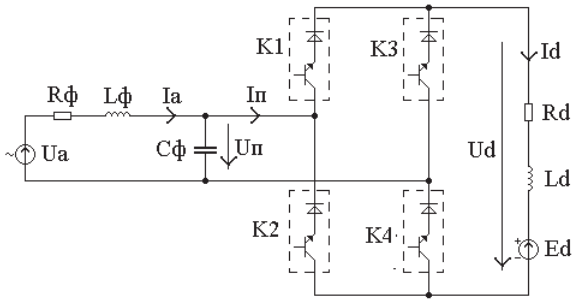


Рис. 1. Силовая часть однофазного мостового АВТ

лейный алгоритм управления силовыми ключами однофазной мостовой схемы, при котором одновременно переключаются диагонально расположенные ключи, реализуя только два их состояний из четырех возможных.

Поэтому целью данной работы является разработка и исследование системы разрывного управления в скользящем режиме активного однофазного выпрямителя тока. Суть метода разрывного управления заключается в создании скользящего режима по границе линии разрыва, заданной уравнением $S\alpha = 0$. Функция $S\alpha$ определяется в зависимости от порядка системы и, в частности, для входного *LC*-фильтра, имеющего 2-й порядок, определяется как линейная комбинация ошибки управления и ее производной. При возникновении скользящего режима координата ошибки стремится к нулю с постоянной времени τ [16]. При этом основная задача синтезируемого релейного регулятора заключается в установлении такой последовательности переключения силовых ключей АВТ, при которой потребляемый из сети ток был бы близок к синусоидальному. Регулирование осуществляется в неподвижной системе координат $(\alpha,\beta,0)$.

Линия скольжения выражается следующим уравнением:

$$S(e_\alpha, e_{d_\alpha}, t) = e_\alpha + \tau_\alpha \cdot e_{d\alpha} = 0, \qquad (1)$$

где $e_\alpha = i_\alpha^* - i_\alpha$, $e_{d\alpha} = \frac{d}{dt} i_\alpha^* - \frac{d}{dt} i_\alpha$ – ошибки по сетевому (входному) току и его производной;

τ_α – параметр, зависящий от постоянной времени желаемой реакции входного тока и определяющий скорость затухания переходного процесса в скользящем режиме. По рекомендациям [17] этот параметр принят равным $\tau_\alpha = 0{,}0001$.

На практике производную входного тока можно определить, зная напряжение на индуктивности входного *LC*-фильтра, тогда выражение (1) преобразуется следующим образом:

$$S(e_\alpha, e_{d\alpha}, t) = (i_\alpha^* - i_\alpha) + \tau_\alpha \times$$
$$\times \left(\frac{di_\alpha^*}{dt} - \frac{u_\alpha - r_\phi \cdot i_\alpha - u_{n\alpha}}{l_\phi} \right) = 0. \qquad (2)$$

Учитывая, что задание на сетевой ток (ток по оси α) является синусоидальным сигналом (совпадающим с питающим напряжением в случае необходимости поддержания единичного коэффициента сдвига), в то время как задающий сигнал по оси β сдвинут на 90°, уравнение (2) принимает следующий вид:

$$S(e_\alpha, e_{d\alpha}, t) = (i_\alpha^* - i_\alpha) + \tau_\alpha \times$$
$$\times \left(\omega \cdot i_\beta^* - \frac{u_\alpha - r_\phi \cdot i_\alpha - u_{n\alpha}}{l_\phi} \right) = 0. \qquad (3)$$

Для определения порядка включения силовых ключей АВТ используется следующее правило:

– если $S_\alpha > 0$, то надо включить такие ключи, чтобы i_α увеличивался, т. е. включаются Кл. 1 и Кл. 4; (4)

– если $S_\alpha < 0$, то надо включить такие ключи, чтоб i_α уменьшался, т. е. включаются Кл. 2 и Кл. 3. (5)

В соответствии с предложенным алгоритмом управления была синтезирована релейная САР в скользящем режиме однофазного мостового АВТ, схема моделирования которой в среде MATLAB/Simulink приведена на рис. 2.

В отличие от силовой схемы, представленной на рис. 1, в модели в цепь нагрузки включен параллельно ее сопротивлению *r*3 конденсатор Cn,

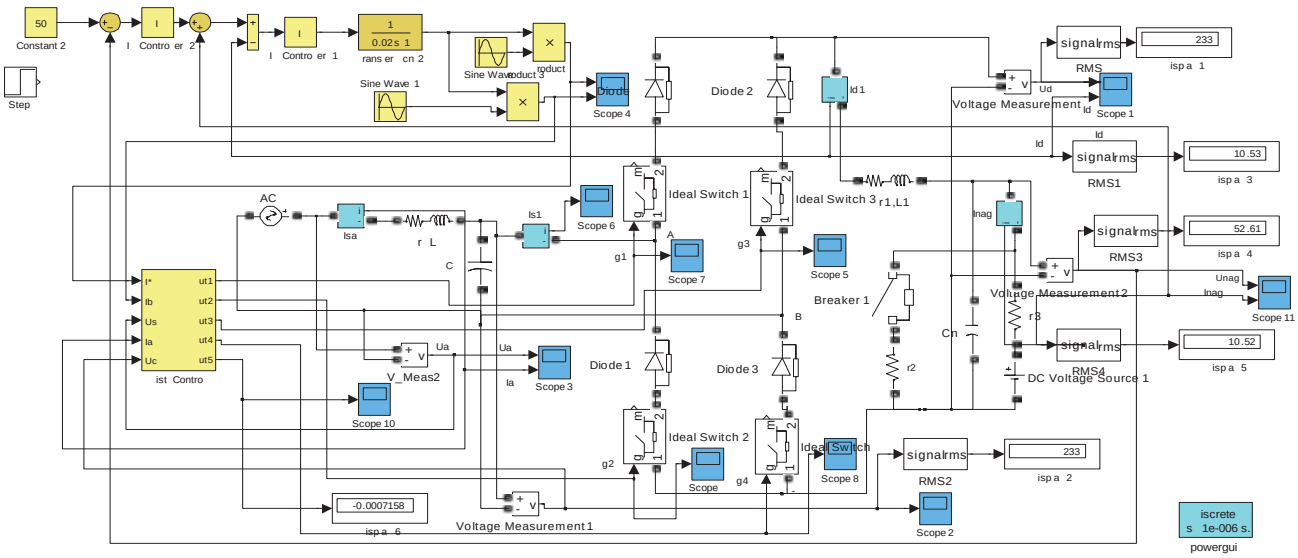


Рис. 2. Схема моделирования в среде MATLAB/Simulink системы разрывного управления в скользящем режиме однофазного мостового активного выпрямителя тока

что позволяет раздельно регулировать не только выпрямленный ток АВТ, но и его выходное напряжение нагрузки Unag, которое измеряется на параллельном соединении конденсатора Cn и сопротивления нагрузки *r*3.

Моделировалась силовая схема АВТ со следующими параметрами:

– активное сопротивление и индуктивность сетевого фильтра $r = 0{,}1$ Ом и $L = 0{,}1$ Гн;

– емкость сетевого фильтра C = 10 микроФ;

– активное сопротивление и индуктивность цепи выпрямленного тока $r1 = 0{,}1$ Ом и $L1 = 0{,}1$ Гн;

– сопротивление и противоЭДС нагрузки $r3 = 10$ Ом и 0 В соответственно;

– емкость, включенная параллельно нагрузке, Cn = 0,001 Ф.

Действующее значение напряжения питающей сети Us = 220 В, частота $f = 50$ Гц.

В модели в момент времени $t = 0{,}2$ с осуществлялся наброс нагрузки (путем замыкания ключа Breker 1), за счет чего скачкообразно уменьшается в два раза сопротивление нагрузки.

Релейный регулятор сетевого тока (Hist Control) был реализован в соответствии с выражениями (3)–(5). На его вход поступают сигналы задания на сетевой ток Ia* и его ортогональную составляющую Ib*, напряжение Us и ток Ia сети, а также напряжение на входе полупроводникового коммутатора АВТ, снимаемого с конденсатора сетевого фильтра Uc.

Выходными сигналами блока Hist Control являются сигналы управления силовыми ключами АВТ (Out1...Out4) и реализованный в соответствии с выражением (3) сигнал Out5, являющийся входным сигналом блока переключения ключей релейного регулятора сетевого тока, в соответствии с симметричным алгоритмом переключения, определяющим состояние силовых ключей АВТ и линию переключения, на которой сигнал ошибки по сетевому току и его производной стремится к нулю.

Из-за высокой частоты переключения силовых ключей можно считать, что релейный регулятор мгновенно отрабатывает задание на сетевой ток. Поэтому на входе блока формирования заданий на сетевой ток и его ортогональную составляющую устанавливается фильтр первого порядка (Trans Fun2) с некомпенсируемой постоянной времени, равной 0,02 с, определяющий показатели качества регулирования в контурах выпрямленного тока и напряжения нагрузки, регуляторы которых синтезированы в соответствии с принципами подчиненного регулирования при настройке обоих регуляторов на технический оптимум. В соответствии со структурой цепи нагрузки на выход ПИ-регулятора напряжения нагрузки (PID Controler 2) поступает компенсирующий сигнал тока нагрузки.

Осциллограммы токов и напряжений в цепях питания, выпрямленного тока и нагрузки представлены на рис. 3, 4 и 5 соответственно.

На рис. 6 представлен входной сигнал блока переключения ключей релейного регулятора сетевых токов, рассчитанный по (3), который свидетельствует о его безупречной работе.

Представленные осциллограммы отражают неплохое регулирование сетевого тока, форма которого чисто синусоидальная, отработка скачка тока нагрузки в момент времени $t = 0{,}2$ с происходит за 0,12 с. Это объясняется невысоким быстродействием ПИ-регуляторов выпрямленного тока и выходного напряжения, т. к. сам релейный регулятор практически безынерционен. Поскольку моделировался случай совпадения фазы задающего сигнала тока сети и напряжения сети, питающее напряжение и ток сети совпадают по фазе. Коэффициент гармоник сетевого тока практически нулевой, коэффициенты сдвига и мощности – единичные.

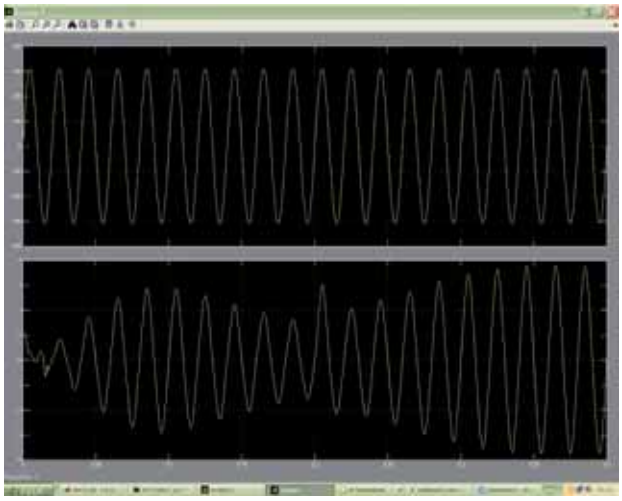


Рис. 3. Напряжение и ток питающей сети

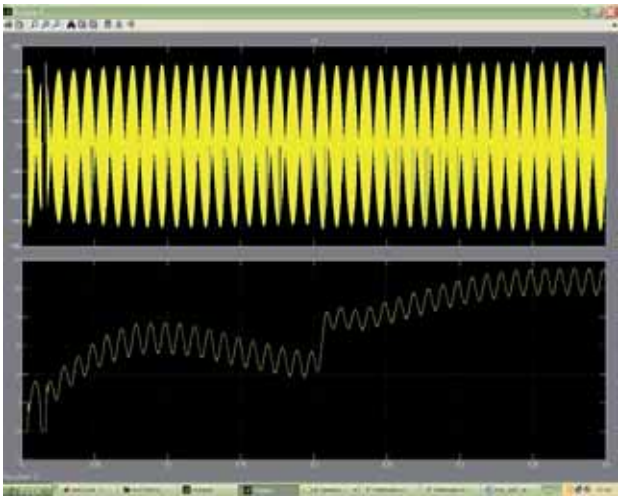


Рис. 4. Выходное напряжение АВТ и выпрямленный ток

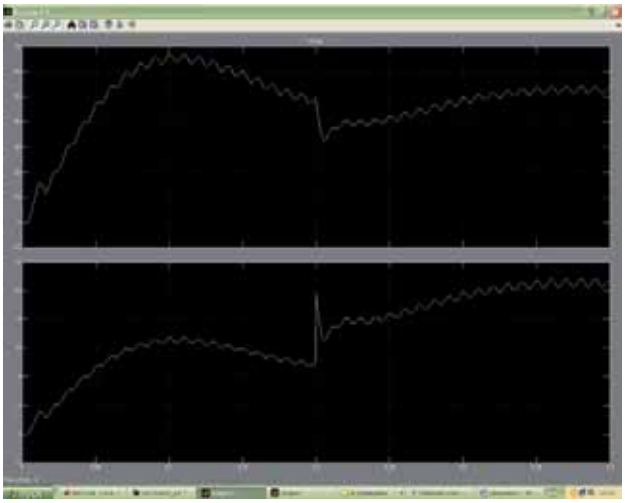


Рис. 5. Напряжение и ток нагрузки

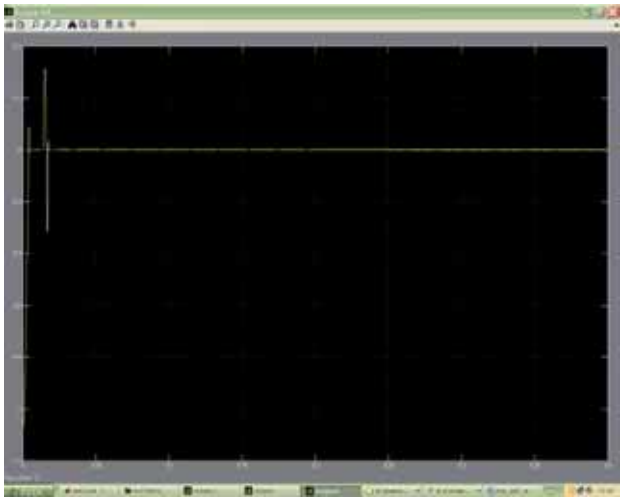


Рис. 6. Входной сигнал блока переключения ключей релейного регулятора сетевых токов

Регулируя фазу сигналов задания сетевого тока и его ортогональной составляющей относительно питающего напряжения, можно регулировать фазу сетевого тока относительно напряжения сети как в сторону опережения, так и отставания. Высокая пульсация выпрямленного тока и тока нагрузки объясняется симметричным алгоритмом управления ключами АВТ, при котором входной ток полупроводникового коммутатора (In) и выпрямленное напряжение АВТ (Ud) двухполярны, и низким значением индуктивности в цепи выпрямленного тока.

Из-за последовательного включения двух ПИ-регуляторов выходных параметров АВТ быстродействие в контурах их регулирования невысокое, что предопределяет дальнейшую доработку этих регуляторов в плане реализации хотя бы одного релейного регулятора выпрямленного тока и оптимизации второго регулятора, что будет являться направлением дальнейших исследований.

Библиографический список

1. *Ефимов А. А.* Управление активными преобразователями в составе электромеханических систем // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журнал. Вып. 2. СПб.: ГУАП, 2012. С. 58–67.

2. *Ефимов А. А., Косулин В. Д., Мельников С. Ю.* Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями // Информационно-управляющие системы: науч. журнал. 2014. № 4. С. 48–53.

3. *Ефимов А. А.* Управление активными преобразователями тока. Завалишинские чтения: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2014. С. 61–67.

4. *Ефимов А. А.* Прогнозирующее релейно-векторное управление активным токовым двухзвенным преобразователем частоты // Тр. VII междун. науч.-практ. конф. «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени». Екатеринбург, 2015. № 2 (7). Ч. 2. С. 50–54.

5. *Ефимов А. А.* Управление активными токовыми двухзвенными преобразователями частоты // Тр. VIII междун. науч.-практ. конф. «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». Новосибирск: Междун. науч. ин-т Educatio, 2015. № 1 (8). Ч. 1. С. 93–97.

6. *Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т.* Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.

7. Стабилизированные автономные инверторы с синусоидальным выходным напряжением / Ф. И. Ковалев, Г. П. Мосткова, В. А. Чванов и др. М.: Энергия, 1972. 152 с.

8. Статические агрегаты бесперебойного питания / Г. Г. Адамия, Е. И. Беркович, А. С. Картавых и др.; под ред. Ф. И. Ковалева. М.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.

9. *Чванов В. А.* Динамика автономных инверторов с прямой коммутацией. М.: Энергия, 1976. 168 с.

10. Проектирование генератора с редкоземельными магнитами в системе электроснабжения летательных аппаратов / А. В. Левин, Д. В. Левин, Э. Я. Лившиц, Б. С. Зечихин // Электричество. 2009. № 10. С. 41–47.

11. *Харитонов С. А.* Система «синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов – активный выпрямитель» (математическая модель) // Электротехника. 2009. № 12. С. 33–41.

12. *Гарганеев А. Г., Харитонов С. А.* Перспективные системы электроснабжения самолета с полностью электрифицированным оборудовани-

ем // Докл. ТУСУРа. Томск: Изд-во ТУСУР, 2009. № 2 (20). С. 185–192.

13. *Волков А. Г.* Многозонные электронные конверторы для автономных систем генерирования электрической энергии: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, 2016. 21 с.

14. *Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Калыгин А. И.* Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. С. 42–49.

15. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными преобразователями частоты в системах электропривода переменного тока / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, Г. С. Зиновьев и др. // Электротехника. 2004. № 10. С. 43–50.

16. *Ефимов А. А., Мухаматшин И. А.* Управление активными преобразователями в системах электроснабжения и электропривода // Известия РАН. Энергетика. 2005. № 4. С. 91–112.

17. *Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Мухаматшин И. А.* Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты // Электротехника. 2005. № 9. С. 47–53.

УДК 621.313.1

А. А. Ефимов
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АСИНХРОННЫЕ ВЕНТИЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С АКТИВНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Для асинхронного вентильного генератора с активным преобразователем напряжения синтезирована система стабилизации выпрямленного напряжения. Для рассматриваемой системы была создана в среде MATLAB/Simulink моделирующая программа, позволяющая анализировать ее динамические и энергетические характеристики при переводе асинхронной машины в генераторный режим и возникновении в ней трехфазного короткого замыкания. Представлены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: *система генерирования электроэнергии, асинхронный вентильный генератор, активный преобразователь напряжения, система стабилизации выпрямленного напряжения, математическое моделирование.*

A. A. Efimov
Dr. Sc., Tech., Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ASYNCHRONOUS VALVE GENERATORS WITH ACTIVE VOLTAGE CONVERTERS

For an asynchronous valve generator with an active voltage converter, a system for stabilizing the rectified voltage is synthesized. For the system under consideration, a simulation program was created in the MATLAB / Simulink environment that allows analyzing its dynamic and energy characteristics when transferring an asynchronous machine to the generator mode and causing a three-phase short circuit in it. The results of mathematical modeling are presented.

Keywords: *power generation system, asynchronous valve generator, active voltage converter, rectified voltage stabilization system, mathematical modeling.*

В связи с перспективами широкого использования асинхронных электрических машин в различных отраслях промышленности одной из актуальных, важных и интересных задач является задача создания систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ) на базе наиболее дешевой, надежной и массово выпускаемой промышленностью асинхронной машины с короткозамкнутым ротором. Выбор типа электромеханического преобразователя, используемого в качестве генератора, имеет особое значение при рассмотрении вопросов генерирования электроэнергии. Общеизвестно, что наилучшими удельными массогабаритными показателями обладают магнитоэлектрические генераторы (МЭГ), что и предопределяет их преимущественное применение при проектировании автономных СГЭЭ [1, 2]. Вместе с тем они имеют и ряд существенных недостатков:

– низкая механическая прочность и сложность механической обработки постоянных магнитов;

– старение магнитных свойств постоянных магнитов;

– возможность размагничивания при высоких температурах;

– высокая стоимость постоянных магнитов;

– сложность организации защит от коротких замыканий, прежде всего ввиду большой запасенной энергии во вращающемся роторе и отсутствия регулировки возбуждения.

С возрастанием скорости вращения приводных двигателей (например, авиадвигателей) до 12...24 тыс. об/мин сложность конструкции МЭГ существенно увеличивается. Для обеспечения прочности ротора применяют слоистую структуру индуктора, в котором постоянные магниты чередуются с немагнитными вставками из высокопрочных материалов, например из титана [3], что ведет к еще большему усложнению и удорожанию МЭГ.

Поэтому усиливается интерес к новым типам электрических машин, таким как синхронно-ги-

стерезисные или вентильно-индукторные. Первый тип электрических машин в генераторном режиме работы практически не исследован, второй тип по энергетическим показателям не уступает синхронным машинам с электромагнитным возбуждением, но проигрывает МЭГ. В последние годы разработчики СГЭЭ вновь обращают внимание на возможности применения в СГЭЭ традиционных асинхронных машин, являющихся наиболее массовыми, надежными и дешевыми. Следует отметить, что одними из первых на возможности работы асинхронной машины в генераторном режиме работы еще в середине XX века обратили внимание именно сотрудники Ленинградского института авиационного приборостроения (ЛИАП). В 1952 г. аспирантом С. И. Бардинским под руководством чл.-корр. АН СССР Д. А. Завалишина была защищена первая в Советском Союзе кандидатская диссертация [4] по исследованию генераторного режима работы асинхронной машины.

Однако работы, проводимые в XX веке рядом выдающихся отечественных и зарубежных ученых, связанные с конденсаторным самовозбуждением асинхронной машины, не получили широкого промышленного применения и не позволили создать СГЭЭ с асинхронными машинами, которые были бы конкурентоспособными с СГЭЭ, построенными на базе МЭГ. Более перспективными были работы, связанные с инверторным возбуждением асинхронных машин, которые принято называть асинхронными вентильными генераторами (АВГ). Значительный вклад в развитие СГЭЭ с АВГ в конце XX века внесли А. И. Скороспешкин, М. Л. Костырев и их ученики [5, 6]. В XXI веке интенсивное развитие силовой электроники и возобновляемой энергетики вновь поставило на повестку дня задачу создания СГЭЭ с АВГ [7, 8, 9], функциональная схема которой представлена на рис. 1.

В состав рассматриваемой СГЭЭ входит асинхронный генератор (АГ), полупроводниковый преобразователь электрической энергии, который в дальнейшем будет рассматриваться исключительно в качестве «активного» [10], система контроля, диагностики и управления (система КДУ)

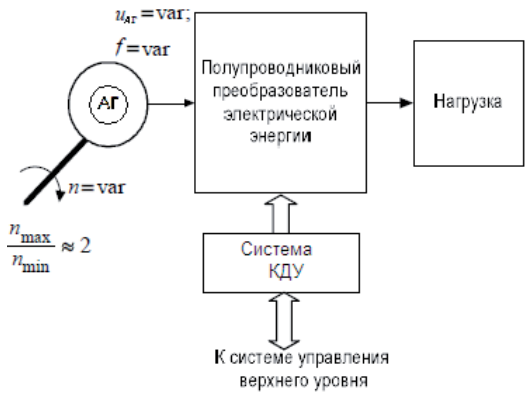


Рис. 1. Функциональная схема СГЭЭ с АВГ

и нагрузка (Н). Активный преобразователь (АП) может быть выполнен двухзвенным, непосредственным или двухзвенно-непосредственным [10].

В свою очередь двухзвенные преобразователи могут быть выполнены на базе либо активных преобразователей напряжения, либо активных преобразователей тока. Выбор типа АП требует детальной проработки в зависимости от конкретных требований технического задания на вид проектируемой СГЭЭ и условий ее эксплуатации.

Вместе с тем опыт разработки и исследования схем АП свидетельствует о наибольшей проработке в настоящее время схемы двухзвенного преобразователя с активным преобразователем напряжения (АПН), в которой его силовая часть (рис. 2) выполняется симметричной относительно звена постоянного тока. Силовая часть двухзвенного АПН содержит два идентичных полупроводниковых коммутатора (ПК): сетевой – транзисторный выпрямитель (ТВ) и нагрузочный – транзисторный инвертор (ТИ), выполненные по трехфазным мостовым схемам. Если реализуется система электроснабжения постоянного тока, то достаточно только одного сетевого ПК, если требуется и сеть переменного напряжения, то используются оба ПК. При этом в режиме генерирования электроэнергии сетевой ПК работает в режиме активного выпрямителя напряжения (АВН), нагрузочный ПК – автономного инвертора напряжения (АИН). Тем самым в СГЭЭ возможно получение электроэнергии как постоянного, так и переменного тока. К цепи выпрямленного напряжения подключена аккумуляторная батарея АБ с широтно-импульсным преобразователем. В систему управления СУ поступают сигналы по выпрямленному напряжению *Ud*, токам выпрямителя *Ia1* и *Ic1* и инвертора *Ia2, Ic2*. Система управления формирует управляющие воздействия в виде импульсов управления выпрямителем ИУВ, инвертором ИУИ, широтно-импульсным преобразователем ИУЗ.

Таким преобразователем обеспечивается возможность электростартерного пуска первичного двигателя (*ПД*), для чего сетевой ПК (ТВ) должен работать в инверторном режиме. Электроэнергия поступает от аккумуляторной батареи через сетевой ПК (ТВ), работающий в инверторном режиме. Асинхронная машина (АГ) в этом случае работает в режиме двигателя и обеспечивает запуск *ПД*. Для повышения его ресурса и повышения КПД системы возможно регулирование частоты вращения асинхронного генератора в широком диапазоне при стабилизации выпрямленного напряжения на постоянном уровне. Зарядка и подзарядка аккумуляторной батареи могут осуществляться независимо от режима работы генератора и первичного двигателя, в том числе одновременно с выполнением ими основных функций.

В СГЭЭ благодаря двухсторонней проводимости АП возможна рекуперация энергии и ее нако-

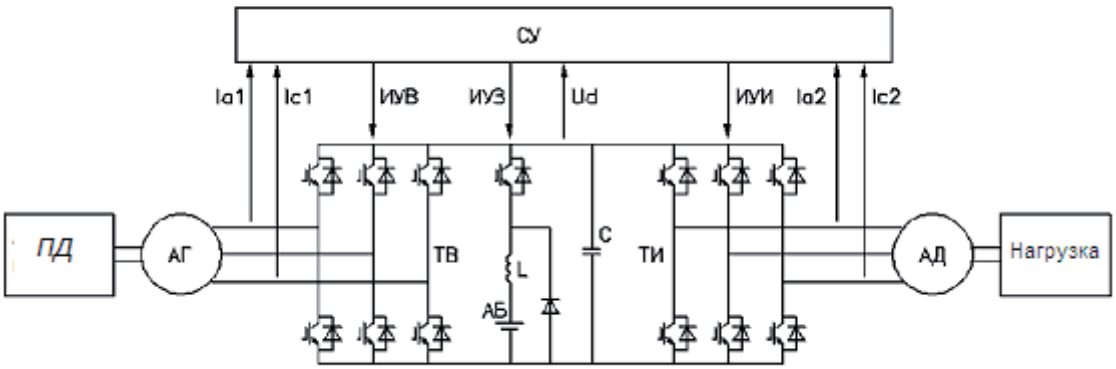


Рис. 2. Силовая часть двухзвенного АПН

пление во вращающихся массах *ПД*. При использовании аккумуляторной батареи достаточной мощности возможна некоторое время работа нагрузки – асинхронного двигателя (АД) от аккумуляторной батареи при остановленном генераторе. Даже при использовании одного сетевого ПК при отключенном генераторе в случае необходимости возможно создание с помощью сетевого активного преобразователя, работающего в инверторном режиме, стабилизированной сети переменного напряжения с питанием ее от аккумуляторной батареи. Все это подтверждает универсальность рассматриваемой схемы СГЭЭ с АВГ [8, 10–13].

СГЭЭ с АВГ по сравнению с аналогичными системами с МЭГ имеют также ряд других преимуществ. Во-первых, асинхронный генератор имеет простейшую конструкцию и не содержит дорогостоящих постоянных магнитов, не допускающих регулировки возбуждения. Это обеспечивает дешевизну и надежность СГЭЭ с АВГ. Во-вторых, токи короткого замыкания асинхронных генераторов меньше, а требования к коммутационной аппаратуре и ко многим другим элементам системы ниже. При резком сбросе нагрузки МЭГ возможно значительное увеличение их напряжения (до 40%). В СГЭЭ с АВГ этот недостаток отсутствует, и требования к элементам системы по напряжению также снижаются.

Задачами, требующими решения, являются исследование процесса инверторного самовозбуждения АВГ с АПН, стабилизации его выпрямленного напряжения и работы в аварийных режимах.

Поэтому в данной работе представлены результаты разработки компьютерной моделирующей программы в среде MATLAB/Simulink АВГ, состоящей из асинхронной машины и трехфазного мостового АПН и исследования перевода асинхронной машины в режим генератора, процесса стабилизации выпрямленного напряжения и работы АВГ в режиме трехфазного короткого замыкания асинхронной машины.

На рис. 3 представлена разработанная схема компьютерной модели АВГ с АПН, состоящего из

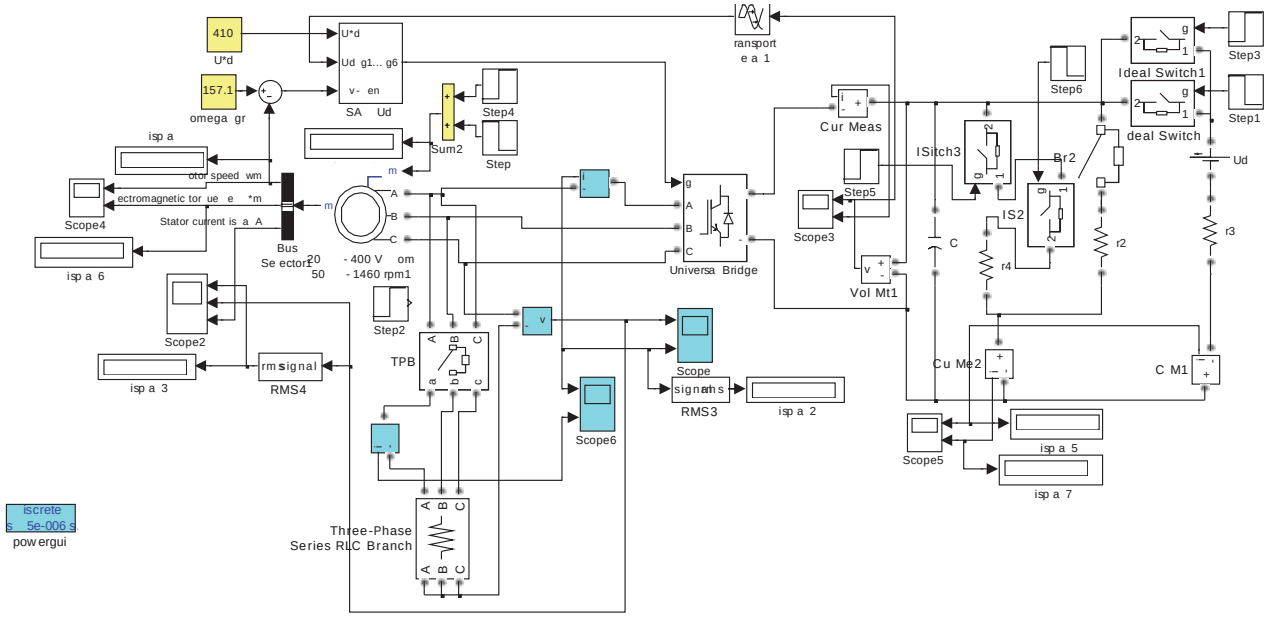


Рис. 3. Схема моделирования АВГ с АПН в среде MATLAB/Simulink

одного сетевого ПК, в среде MATLAB/Simulink, в которой реализуется как двигательный, так и генераторный режим работы асинхронной машины. При реализации первого режима Universal Bridge, выполненный на IGB-транзисторах с обратными диодами, работает в инверторном режиме, во втором случае он работает в режиме АВН. В схеме управления АПН реализован алгоритм синусоидальной ШИМ ($f_{шим}$ = 5 кГц). В первом режиме для повышения быстродействия коэффициент модуляции принят равным 1, во втором – определяется выходным сигналом ПИ-регулятора выпрямленного напряжения АВН, настройки которого несколько отличаются от стандартных настроек на симметричный оптимум. Действительно, опыт автора в разработке векторных САР активных преобразователей [10–12] свидетельствует о том, что постоянную времени числителя передаточной функции регулятора напряжения и фильтра в цепи задания следует выбирать равной 14Tμ, а постоянная времени знаменателя – 64Tμ, где Tμ – некомпенсируемая постоянная времени, равная в данной работе 0,0005 с.

В работах автора [13–16] достаточно подробно рассмотрены различные системы регулирования активных преобразователей: векторные, разрывные в скользящем режиме, прогнозирующие релейно-векторные. В данном случае, т. к. интерес представляет процесс перевода машины из двигательного в генераторный режим и процесс стабилизации выпрямленного напряжения, реализована простейшая САР с ПИ-регулятором выпрямленного напряжения (SAR_Ud). Поддержание единичного коэффициента сдвига тока и напряжения асинхронной машины при этом не требуется, а перевод ее из двигательного в генераторный режим происходит за счет ступенчатого приложения отрицательного момента и автоматического перевода АПН в режим АВН при изменении направления тока в звене постоянного тока (ЗПТ) без изменения алгоритма управления ключами АПН, благодаря его двухсторонней токовой проводимости. Хотя не представляет никакого труда реализовать опережающий коэффициент сдвига, что будет равносильно подключению дополнительной емкости к зажимам асинхронной машины. В модели переход из двигательного в генераторный режим работы происходит по сигналу, свидетельствующему о превышении скорости ротора значения синхронной частоты вращения (157,1 рад/с). В модели использованы следующие параметры стандартной асинхронной машины, учитывающей насыщение: Pном = 15 кВт, Uном(лин) = 400 В, fном = = 50 Гц, Rs = 0,2147 Ом, Lsσ = 0,000991 Гн, Rr = = 0,2205 Ом, Lrσ = 0,000991 Гн, Lm = 0,06419 Гн, J = 0,102 кг/м^2, p_n = 2. Параметры насыщения магнитной цепи заданы в MATLAB.

Источник постоянного напряжения в ЗПТ Ud = 300 В, его внутреннее сопротивление равно 0,1 Ом, емкость Cd = 3 mФ. Для возможности отключения и подключения источника в ЗПТ, а также сопротивления нагрузки в любой момент времени использованы идеальные ключи.

Для моделирования процесса однократного подключения нагрузки в ЗПТ используется ключ переменного тока (Br2), т. к. отключать нагрузку он может только при переходе тока через ноль. К асинхронной машине через трехфазный переключатель (ТРВ) подключена трехфазная нагрузка, с помощью которой реализуется либо искусственная нейтраль (в нулевой момент времени подключается активная трехфазная нагрузка с величиной сопротивления в несколько кОм), либо трехфазное короткое замыкание в требуемое время, отключаемое через заданный при моделировании интервал времени.

Пуск асинхронной машины в двигательном режиме происходит при нулевом моменте нагрузки. При превышении скоростью ротора синхронного значения к асинхронной машине прикладывается внешний генераторный момент (в дальнейших результатах равный номинальному значению 100 нм). Для реализации возможности его отключения через сумматор к валу машины может быть подключен в требуемое время момент, имеющий противоположный знак. Процессы в модели АВГ с АПН при переводе асинхронной машины в генераторный режим при t = 0,24 с. представлены на рис. 4–7. При пуске двигателя напряжение на конденсаторе ЗПТ остается почти неизменным (около 300 В), а входной ток АПН имеет положительное среднее значение.

После t = 0,24 с выпрямленное напряжение (рис. 4) по окончании переходного процесса устанавливается равным заданному значению (U*d = 410 В), а ток на выходе АВН меняет знак, что свидетельствует об изменении направления передачи энергии через АПН. Осциллограммы, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что в момент времени t = 0,24 с источник питания отключается, а в ЗПТ подключается сопротивление нагрузки, равное 12,5 Ом. Частота вращения асинхронной машины (рис. 6) в этот момент времени превышает значение синхронной частоты вращения (157,1 рад/с), она переходит в генераторный режим работы, а развиваемый ею электромагнитный момент уравновешивает приложенный извне. Напряжение и ток асинхронной машины (рис. 7) в двигательном режиме работы большую часть периода совпадают по фазе, в генераторном – практически в противофазе, что и подтверждает факт перехода машины из двигательного в генераторный режим работы.

Процессы в замкнутой системе стабилизации выпрямленного напряжения АВН (SAR_Ud) представлены на рис. 8. На верхнем графике приведен сигнал рассогласования на входе ПИ-регулятора напряжения, который в установившемся режиме стремится к нулю, что свиде-

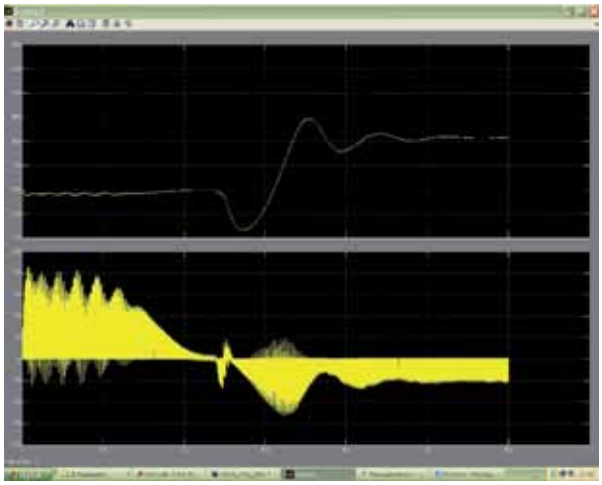


Рис. 4. Процессы в звене постоянного тока АПН

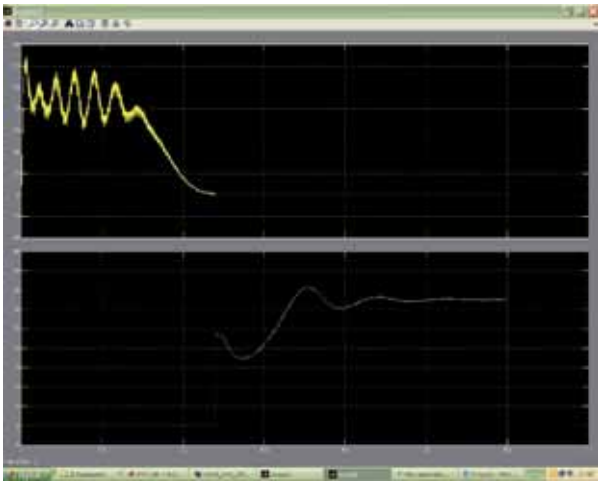


Рис. 5. Ток источника питания постоянного тока и нагрузки

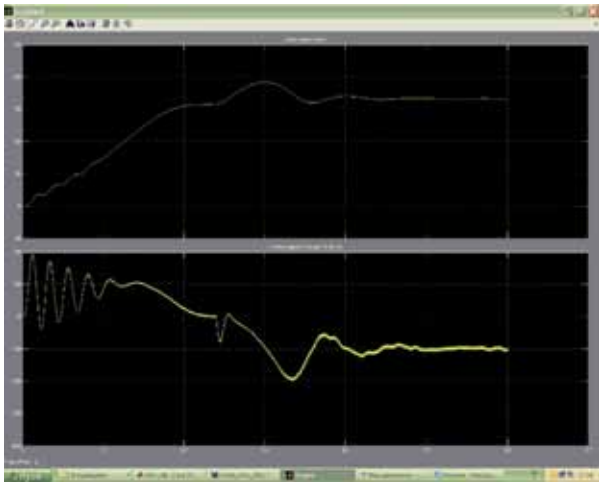


Рис. 6. Частота вращения и момент асинхронной машины

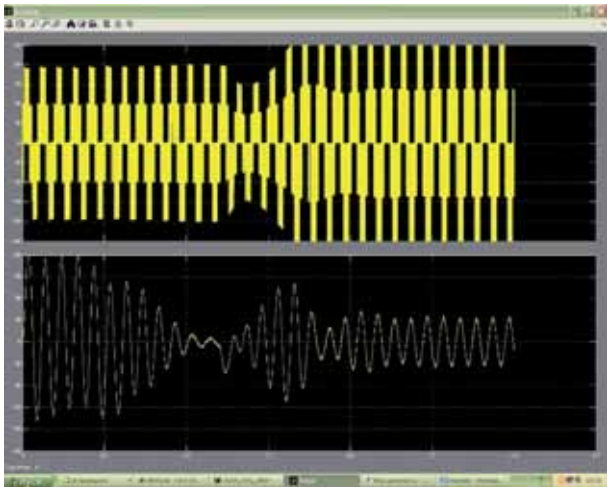


Рис. 7. Напряжение и ток асинхронной машины

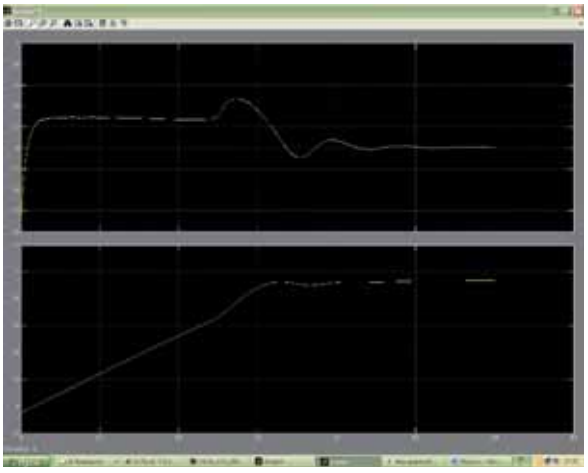


Рис. 8. Входной и выходной сигналы ПИ-регулятора в SAR_Ud

тельствует о нулевой статической ошибке в отработке задающего значения выпрямленного напряжения. На нижней осциллограмме показан выходной сигнал ПИ-регулятора, равный требуемой величине коэффициента модуляции ШИМ, который не превышает единичного значения, что свидетельствует о работе узла синусоидальной ШИМ в линейном режиме.

Проведенные исследования свидетельствуют, что особых проблем с переводом в генераторный режим АВГ с АПН и стабилизацией его выпрямленного напряжения не существует. Однако при этом следует учитывать ряд обстоятельств.

1. Недопустимо изменять структуру системы управления (допустим, синусоидальная ШИМ и векторная САР в двигательном режиме, прогнозирующее релейно-векторное управление или разрывное – в генераторном), т. к. это приводит к срыву процесса возбуждения.

2. Переход в генераторный режим работы происходит и в модели асинхронной машины, не учитывающей насыщения магнитной цепи.

3. Необходимо также понимать, что стандартная модель асинхронной машины (даже с учетом насыщения, что использовалось в данной работе) в среде MATLAB/Simulink не отражает физику процесса самовозбуждения асинхронной маши-

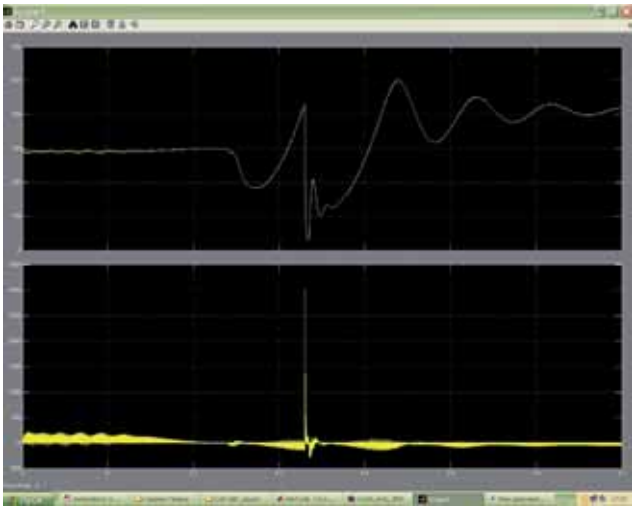


Рис. 9. Процессы в ЗПТ при трехфазном коротком замыкании в АВГ

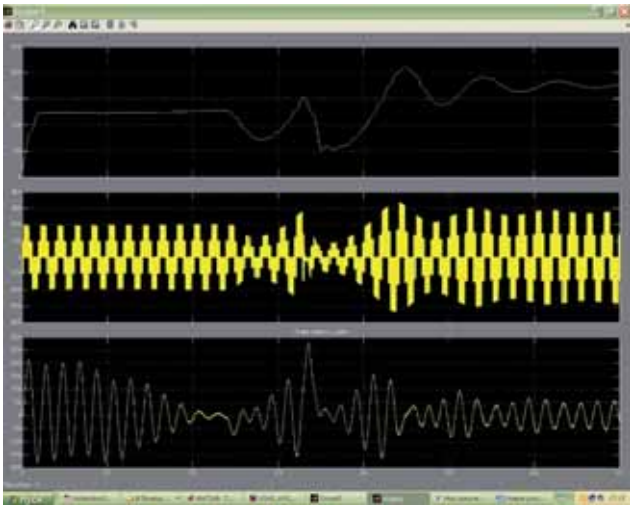


Рис. 10. Фазное напряжение и ток асинхронной машины при трехфазном КЗ

ны, который, согласно последним исследованиям [9], связан с параметрическим резонансом, возникающим при изменении индуктивности, вызванном зубцовой пульсацией магнитного потока при наличии емкостного тока. Поэтому процессы, полученные в модели, соответствуют не процессам самовозбуждения асинхронной машины (которые необходимо дополнительно закладывать в модель), а процессам принудительного перевода асинхронной машины в генераторный режим работы.

С учетом сделанных замечаний разработанная компьютерная модель позволяет проводить достаточно большой объем исследований по влиянию параметров рассматриваемой системы на процесс перевода АВГ с АПН из двигательного в генераторный режим, получать динамические и энергетические характеристики, а также анализировать аварийные режимы, возникающие в АВГ.

Проведенные исследования режима трехфазного короткого замыкания (КЗ) показали, что при длительности этого режима, меньшего 0,09 с, АВГ, при условии сохранения его работоспособности, способен и дальше стабилизировать выпрямленное напряжение на прежнем уровне, что подтверждают результаты моделирования, представленные на рис. 9 и 10.

На верхнем графике рис. 10 приведен сигнал, соответствующий действующему значению фазного напряжения асинхронной машины, остальные аналогичны представленным на рис. 7. Если режим короткого замыкания длится больше 0,09 с, асинхронная машина теряет возбуждение и, если не снять внешний момент, раскручивается до значительных скоростей при нулевом выпрямленном напряжении. Однако, если при этом отключить нагрузку в ЗПТ и внешний генераторный момент, это позволит при подключении вновь источника напряжения в ЗПТ снова перевести электрическую машину в генераторный режим работы, т. к. благодаря инерционности ротора ее скорость достаточно долго не меняется. Все это свидетельствует об отличных свойствах асинхронной машины при возникновении в ней аварийных режимов за счет ее развозбуждения и естественного ограничения токов короткого замыкания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования позволяют утверждать о серьезных достоинствах АВГ с рассмотренным в данной работе активным преобразователем напряжения.

2. Все результаты синтеза систем автоматического управления активными преобразователями, полученные ранее в работах автора применительно к системам электропривода, напрямую применимы для СГЭЭ.

3. Задачами, требующими первоочередного дальнейшего решения, следует считать проведение сравнительного анализа использования в автономных (авиационных) СГЭЭ различных типов активных преобразователей, а также проектирование и изготовление высокоскоростных авиационных асинхронных машин, которые в настоящее время в нашей стране полностью отсутствуют.

4. Только при выполнении всего вышесказанного можно проводить сопоставительный анализ автономных СГЭЭ с МЭГ и АВГ.

Библиографический список

1. *Харитонов С. А.* Система «синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов – активный выпрямитель» (математическая модель) // Электротехника. 2009. № 12. С. 33–41.

2. *Гарганеев А. Г., Харитонов С. А.* Перспективные системы электроснабжения самолета с полностью электрифицированным оборудованием: докл. ТУСУРа. Томск: Изд-во ТУСУР, 2009. № 2 (20). С. 185–192.

3. Проектирование генератора с редкоземельными магнитами в системе электроснабжения летательных аппаратов / А. В. Левин, Д. В. Левин, Э. Я. Лившиц, Б. С. Зечихин // Электричество. 2009. № 10. С. 41–47.

4. *Бардинский С. И.* Исследование асинхронно-ионного каскада в генераторном режиме: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИАП, 1952. 22 с.

5. *Костырев М. Л., Скороспешкин А. И.* Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. М.: Энергоатомиздат. 1993. 157 с.

6. Алгоритм проектирования асинхронных генераторов с вентильным возбуждением для автономных объектов / М. Л. Костырев, Н. В. Мотовилов, А. А. Дружков, М. Л. Костырев // Электротехника. 1986. № 7. С. 32–35.

7. *Гентковски З.* Процессы и характеристики автономных асинхронных генераторов с полупроводниковыми регуляторами: автореф. дисс. ... докт. тех. наук: 05.09.01. СПб.: ВНИИ Электромаш, 2000. 41 с.

8. *Воронцов А. Г.* Исследование системы с многофазным асинхронным генератором и многотактными активными преобразователями: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. СПб.: ГУАП, 2007. 16 с.

9. *Падалко Д. А.* Электромагнитные процессы генерирования электроэнергии в мехатронной системе с асинхронной машиной: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Томск: НИ ТПУ, 2017. 20 с.

10. *Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т.* Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.

11. Алгоритмы и системы управления активным выпрямителем напряжения / А. А. Ефимов, А. А. Базарнов, В. А. Глухов и др. // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: научн. журнал. Вып. 3. СПб.: ГУАП, 2013. С. 20–31.

12. *Ефимов А. А., Базарнов А. А., Глухов В. А.* Энергетические и динамические показатели работы опытного образца активного выпрямителя напряжения // Завалишинские чтения: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2013. С. 57–61.

13. *Ефимов А. А.* Управление активными преобразователями в составе электромеханических систем // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журнал. СПб.: ГУАП, 2012. Вып. 2. С. 58–67.

14. *Ефимов А. А., Косулин В. Д., Мельников С. Ю.* Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями // Информационно-управляющие системы: науч. журнал. 2014. № 4. С. 48–53.

15. *Ефимов А. А.* Управление активными преобразователями тока. Завалишинские чтения: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2014. С. 61–67.

16. *Ефимов А. А.* Прогнозирующее релейно-векторное управление активным токовым двухзвенным преобразователем частоты. Труды VII международной научно-практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени». Екатеринбург. 2015. № 2 (7). Ч. 2. С. 50–54.

УДК 692.7.016

А. А. Зайцев[1]
инженер-конструктор 3-й категории

Д. С. Положенцев[2]
инженер 1-й категории

Д. О. Якимовский[3]
кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела
[1,2,3]АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО РУЛЕВОГО ПРИВОДА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В настоящей работе представлены результаты проектирования исполнительного следящего электромеханического рулевого привода (ЭРП) для беспилотного летательного аппарата (БЛА). Электропривод предназначен для управления поворотом рулей БЛА по сигналам управления, поступающим из бортовой аппаратуры системы управления.

Ключевые слова: *система управления беспилотным летательным аппаратом, исполнительный электропривод, статическая ошибка.*

A. A. Zaycev[1]
Engineer-designer of the 3rd Category

D. S. Polozhentcev[2]
Engineer of the 1st Category

D. O. Yakimovsky[3]
PhD, Tech., The Head of Research Department
[1,2,3]AO "Command Devices Reseach Institute", St. Petersburg

RESULTS OF THE DESIGN OF THE EXECUTIVE ELECTROMECHANICAL STEERING DRIVE FOR A UNMANNED FLYING APPARATUS

In this paper we present the results of designing a four-channel servo electromechanical steering drive (ESA) for an unmanned aerial vehicle (UAV). The electric drive is designed to control the steering wheel of the UAV according to control signals coming from the onboard equipment of the control system.

Keywords: *control system of unmanned aerial vehicle, executive drive, static error.*

В настоящей работе представлены результаты проектирования исполнительного электропривода (ИЭП) четырехканального электромеханического рулевого привода (ЭРП) для беспилотного летательного аппарата (БЛА), разработанного ранее и представленного в «Завалишинских чтениях'16».

Основное назначение ИЭП ЭРП заключается в отработке задаваемых из системы управления БЛА угловых положений рулевого устройства. Максимальный угол поворота выходного вала ИЭП ± (20±0,5)°.

Также ИЭП должен обеспечивать отработку входного сигнала управления выходным звеном с угловой скоростью:

– при отсутствии крутящего момента время переходного процесса при повороте на угол 20° по углу должно быть не более 0,14 с;

– при действии максимального крутящего момента 12 Н·м время переходного процесса при

повороте на угол 20° по углу должно быть не более 0,16 с.

Отработка ступенчатого заданного угла 20° в обоих направлениях должна иметь:

– перерегулирование в пределах ±2%;

– статическую ошибку по отработанному углу в пределах ±0,1°.

Структурная схема ИЭП БЛА представлена на рис. 1.

Перечень сокращений, принятых на рис. 1: СУ – система управления; ОУ – объект управления; ТХИТ – тепловой химический источник тока; БУП – блок управления приводами; МПИ – магистральный последовательный интерфейс; МК – микроконтроллер; UART – универсальный асинхронный приемопередатчик; ВИП – вторичный источник питания; ИЭП – исполнительный электропривод; Р – редуктор; ДКИ – датчик кода измерителя углового положения ОУ; ДВ – электродвигатель; ЭП – электронный преобразователь; КУМ – ключевой усилитель мощности [1].

ИЭП построен на базе вентильного двигателя, при этом реализована двухконтурная система управления. Внешний контур является контуром регулирования углового положения. Внутренний контур обеспечивает работу вентильного двигателя в оптимальном режиме [2].

В контуре регулирования угла углового положения был реализован ПД-регулятор [3].

Питание КУМ ИЭП происходит от тепловых химических источников тока (ТХИТ), имеющих широкий диапазон выходных напряжений от 44 до 74 В. Схемотехника КУМ (ШИМ) выполнена таким образом, что его коэффициент передачи зависит от напряжения питания, в результате чего могут изменяться статические и динамические параметры ИЭП. Так, при высоких напряжениях питания (примерно 70–74 В) оказалось невозможным обеспечить выполнение технического требования в части величины перерегулирования по угловому положению, как показано на рис. 2. В случае снижения величины перерегулирования путем изменения коэффициентов ПД-регулятора не выполнялось требование по допустимой статической ошибке отработки заданного углового положения для диапазона низких напряжений КУМ (44–50 В).

Напряжение питания КУМ можно стабилизировать ВИП, однако в связи с жесткими габаритно-массовыми требованиями, предъявляемыми к ЭРП, сделать это не представляется возможным.

Для решения этой проблемы значения пропорциональной и дифференциальной составляющих регулятора коэффициенты определялись в процессе работы привода как функции от напряжения питания КУМ. В процессе интерполяции коэффициентов для минимального и макси-

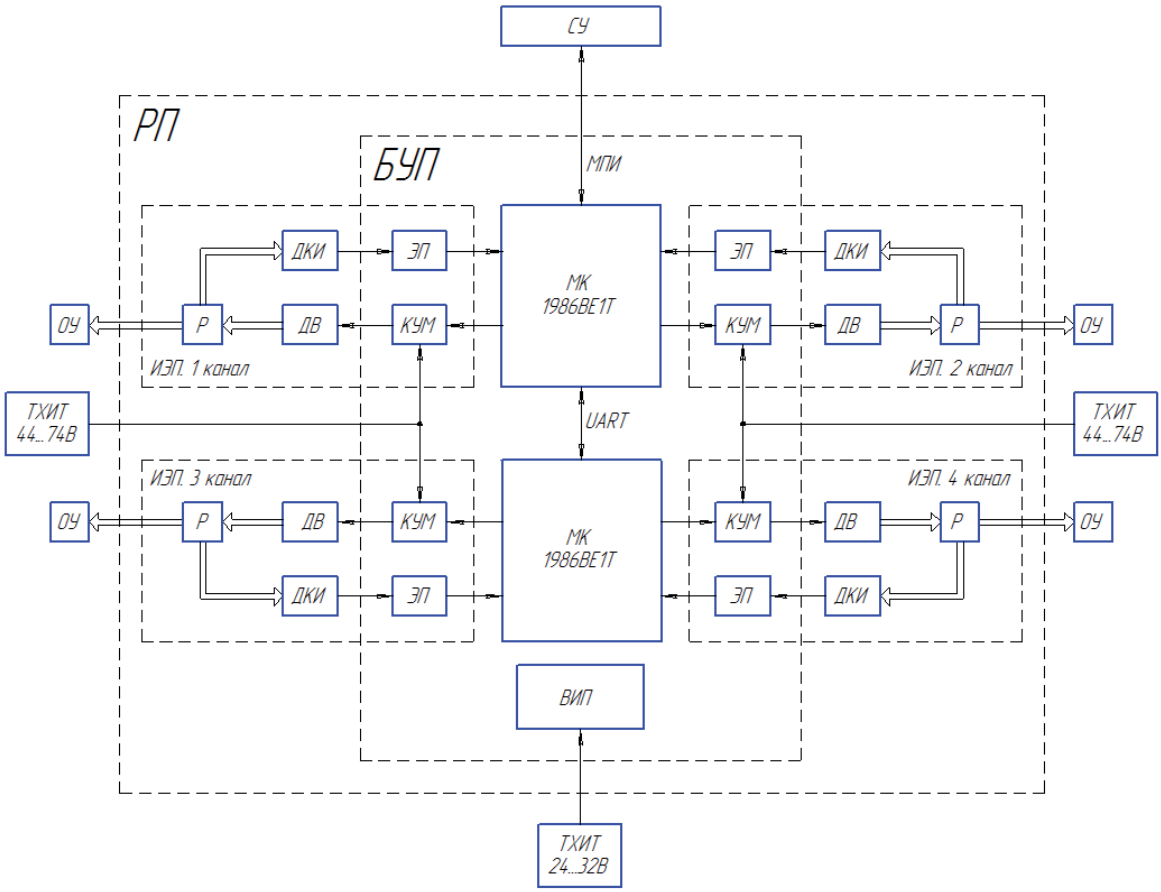


Рис. 1. Структурная схема ИЭП для четырех каналов БЛА

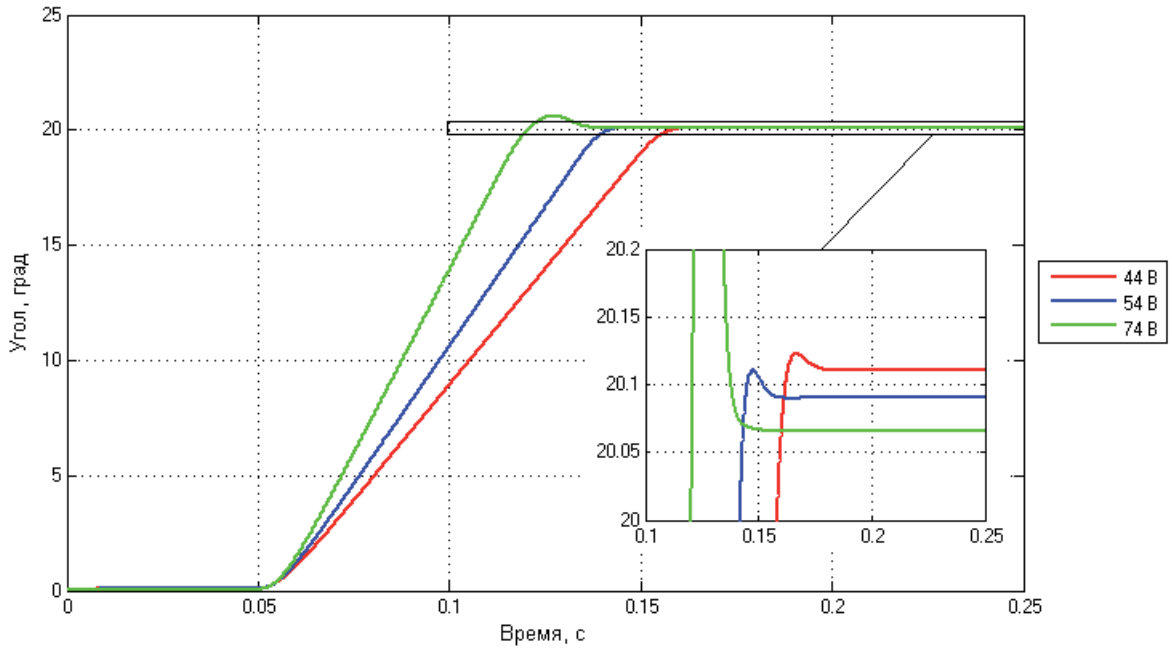


Рис. 2. Переходные процессы при повороте на угол + 20°. Напряжение питания КУМ 46 В, 54 В, 74 В

мального значения напряжения питания КУМ были получены следующие зависимости:

$$Kp = 330 - 3 \cdot Uп, \quad (1)$$

$$Kd = 490 - 4 \cdot Uп, \quad (2)$$

где Kp – коэффициент пропорциональной составляющей регулятора;

Kd – коэффициент дифференциальной составляющей регулятора;

$Uп$ – величина напряжения питания КУМ.

Результаты моделирования работы ИЭП с таким способом регулирования показаны на рис. 3. Подобный способ регулирования позволил снизить величину перерегулирования по угловому положению при высоком напряжении питания КУМ и получить величину статической ошибки, удовлетворяющую требованиям технического задания во всем диапазоне напряжений питания КУМ.

Экспериментальная проверка отработки заданных углов поворота выходного вала проводилась при отработке углов поворота рулей на + 20° без внешних нагрузочных моментов. Динамические параметры каналов ИЭП контролировались по оптическому измерителю углового положения,

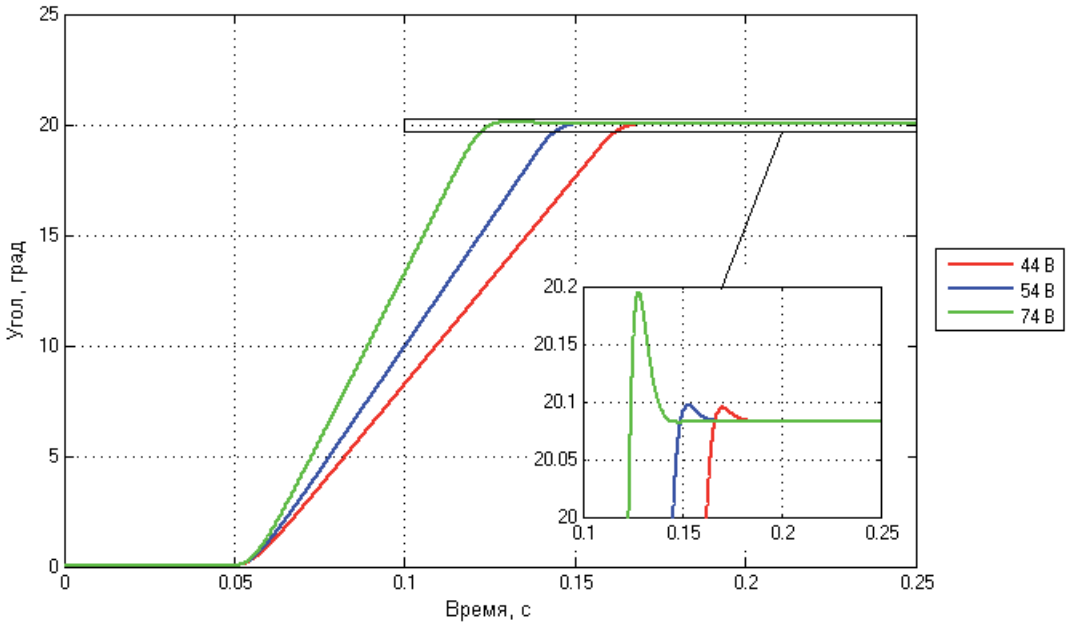


Рис. 3. Переходные процессы при повороте на угол + 20° при работе с переменными коэффициентами регулятора. Напряжение питания КУМ 46 В, 54 В, 74 В

установленному с помощью дополнительных приспособлений по оси рулей. На рис. 4 приведены переходные процессы отработки ИЭП угла + 20° при различных напряжениях питания КУМ.

Проверка отработки заданных углов поворота рулей выходного вала проводилась при имитации внешних нагрузочных моментов, создаваемых воздушным потоком. Нагрузочные моменты создавались с помощью пружин в соответствии с рис. 5. Коэффициент жесткости $K \approx 0{,}8\frac{\text{Нм}}{\text{град}}$. На рис. 6 приведены переходные процессы отработки углов на +20° при воздействии линейно изме-

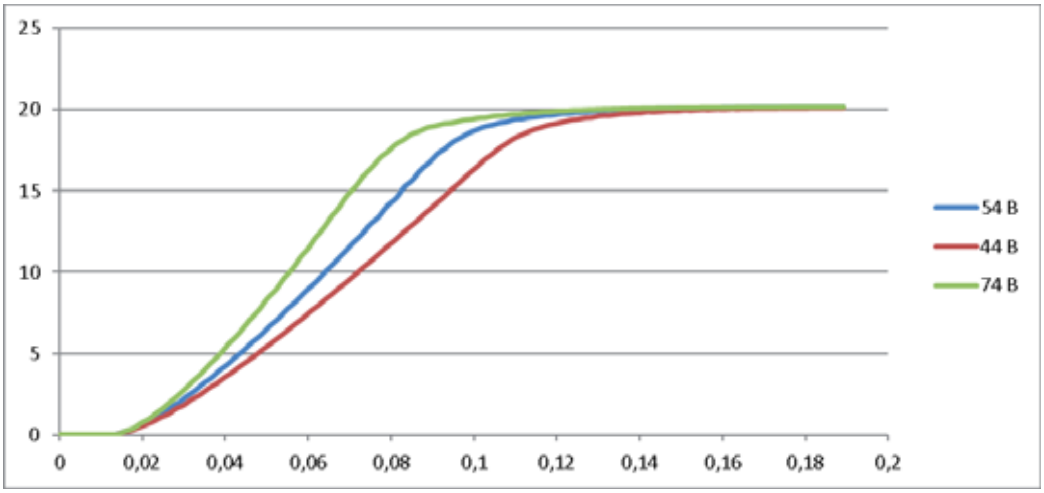


Рис. 4. Переходные процессы при повороте на угол +20°. Напряжение питания КУМ 46 В, 54 В, 74 В. Холостой ход

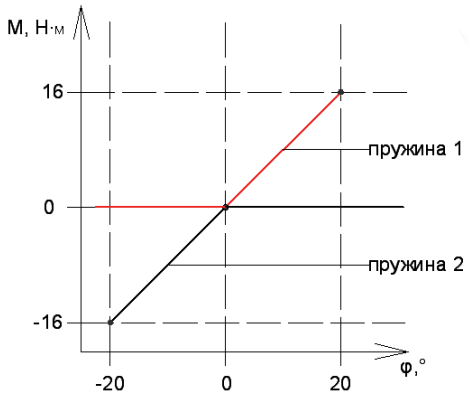


Рис. 5. Диаграмма нагрузочных моментов

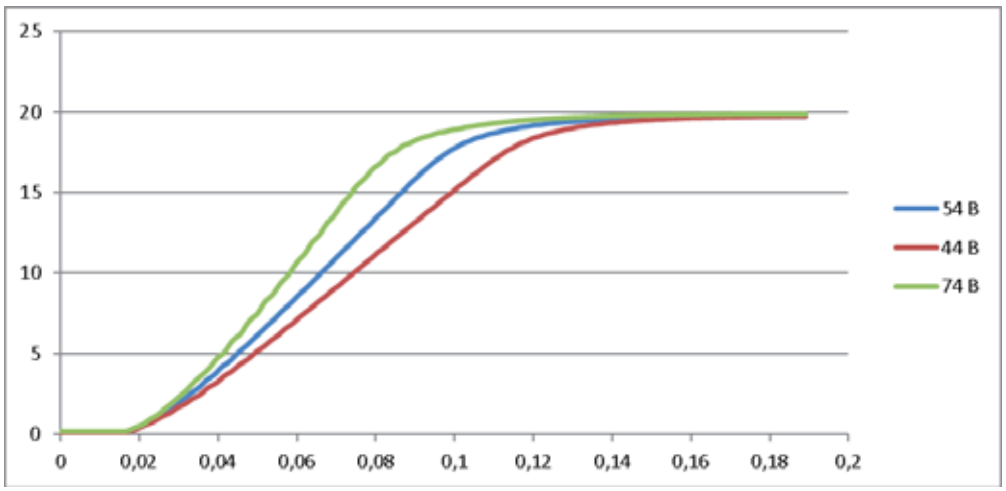


Рис. 6. Переходные процессы при повороте на угол +20°. Напряжение питания КУМ 46 В, 54 В, 74 В. Нагрузочный момент линейно возрастает от 0 до 16 Н·м

Таблица 1

Проверка статической ошибки

Направление действия момента	Напряжение питания, В	Максимальная статическая ошибка
против часовой стрелки	74	4′55″
по часовой стрелке	74	4′10″
против часовой стрелки	46	5′10″
по часовой стрелке	46	4′55″

няющегося момента от 0 до 16 Н·м при различных напряжениях питания КУМ.

Результаты проверки статической ошибки ИЭП приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

Подтверждена эффективность ПД-регулятора с переменными коэффициентами как функции напряжения питания КУМ, что позволило обеспечить выполнение требований технического задания.

Полученные в ходе испытаний результаты свидетельствуют о правильности принятых при проектировании ИЭП технических решений.

Библиографический список

3. *Зайцев А. А., Бураков М. В.* Завалишинские чтения'16: сб. докл. СПб.: Санкт-Петербург. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2016. 38 с.

4. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. 3-е изд., испр. М.: Наука, 1995. 301 с.

5. *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

УДК 621.314

В. В. Колесников
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННОГО ВЕКТОРА ПАРКА ТОКА В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Предложена имитационная схема моделирования дефектов в обмотках силовых трехфазных трансформаторов в среде Matlab/Simulink на основе библиотечной модели. С помощью этой схемы промоделированы различные короткие замыкания и обрывы обмоток силовых трансформаторов, несимметричность обмоток, а также работа трансформатора без дефекта. Диагностирование дефектов выполнено на основе анализа модуля и годографа вектора Парка тока. Показано, как по виду годографа и спектру сигнала можно диагностировать дефект.

Ключевые слова: *трехфазный трансформатор, неисправности обмотки, диагностика, расширенный подход на основе вектора Парка.*

V. V. Kolesnikov
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SIMULATION OF THREE-PHASE POWER TRANSFORMERS DEFECTS IN THE MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

The simulation scheme of modelling faults in three – phase power transformers in the Matlab / Simulink environment on the basis of library model is offered. With the help of this scheme various short-circuit and open transformer windings, the asymmetry of the transformer winding, as well as healthy operation of the three – phase power transformers were simulated. Faults diagnosing was carried out on the basis of module and hodograph Park's Vector current. It is shown how through the hodograph form and signal spectrum the faults can be diagnosed.

Keywords: *three-phase power transformer, fault detection, the extended Park's vector approach.*

Силовые трансформаторы являются основными устройствами в системе передачи и распределения электроэнергии. Выход из строя силового трансформатора может вызвать разрыв в энергоснабжении и привести к крупной аварии. Затраты на их приобретение, замену, транспортировку, монтаж и ремонт являются значительными. Поэтому профилактика и мониторинг состояния необходимы для прогнозирования зарождающихся неисправных состояний, а также для планирования отключений, обслуживания и выхода из строя трансформаторов [1–3].

Обычно на практике силовые трансформаторы диагностируют на основе анализа газа, растворенного в масле; на электрическом и/или акустическом обнаружении частичных разрядов; на определении степени полимеризации бумажной изоляции; анализа частотной характеристики или измерении угла диэлектрических потерь ($tan\ \delta$). Другие методы используют анализ вибрации, тока намагничивания, магнитного потока утечки, сопротивления обмотки или коэффициента трансформации обмотки [4]–[6].

На самом деле дефекты обмоток являются наиболее значимым типом отказов, которые происходят в силовых трансформаторах, и являются наиболее продолжительными по времени простоя [2].

В последние годы в связи с созданием Smart Grids сетей проводятся работы по созданию инновационных систем диагностирования электрооборудования. Так, в работе [1] описана система диагностирования силовых трансформаторов в реальном времени, установленных на магистральных подстанциях. Это инновационная система диагностирует трансформаторы, используя одновременно два диагностических подхода. Первый основан на анализе вектора Парка тока

намагничивания при нагрузке силового трансформатора [2, 3, 7]. Второй подход основан на вычислении некоторых электрических параметров за интервал времени в математической модели силового трансформатора. Эти параметры непрерывно контролируются и сравниваются с контрольными величинами, которые сохранены во время периода ввода в действие диагностической системы. Причем оба подхода основаны на анализе электрических переменных: токов и напряжений в первичной и во вторичной обмотке силового трансформатора. Эта информация обычно имеется, так как трансформаторы тока (CTs) и трансформаторы напряжения (VTs) уже установлены на подстанции при ее монтаже и используются, чтобы собирать токи и напряжения каждого силового трансформатора в блоке системы диагностирования в реальном времени (рис. 1).

Система полностью неинтрузивная и не требует дополнительной установки чувствительных элементов в силовом трансформаторе, будучи полностью установленной на строящейся подстанции.

Используемый в работе [1] подход на основе вектора Парка тока широко используется и для диагностирования работы асинхронных двигателей [7]. Это неинвазивная методика показала также свою эффективность и для диагностики возникновения дефектов межвитковой изоляции в обмотках трехфазных трансформаторов в процессе работы [2, 3]. Результаты экспериментальных исследований в этих работах сравнивались с использованием цифрового моделирования годографов вектора Парка тока трансформатора, полученных из расчета двух эквивалентных схем замещения его магнитной и электрической цепи.

Мониторинг и диагностирование технического состояния трансформаторов являются необходимыми условиями внедрения технологии Smart Grid в промышленных электрических сетях.

Проведенный анализ позволяет заключить, что вопросы моделирования дефектов обмоток трехфазных трансформаторов в среде MATLAB/Simulink рассмотрены недостаточно. Моделирование удобно выполнить на основе расширенного анализа вектора Парка – EPVA (The Extended Park's Vector Approach). Это позволит студентам и инженерам, проходящим переподготовку, познакомиться с современными методами диагностики силовых трансформаторов.

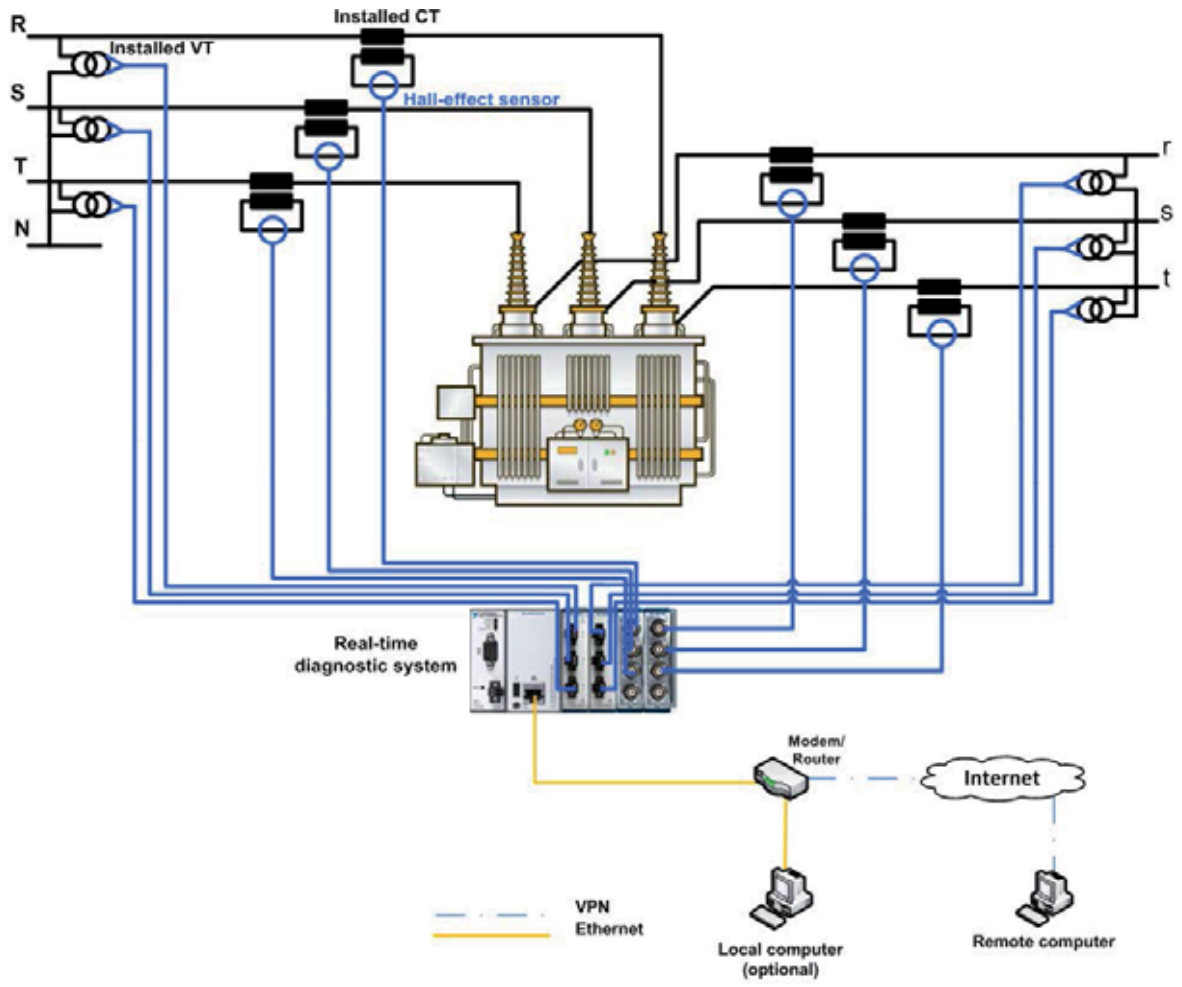


Рис. 1. Архитектура системы диагностики силовых трансформаторов в реальном времени

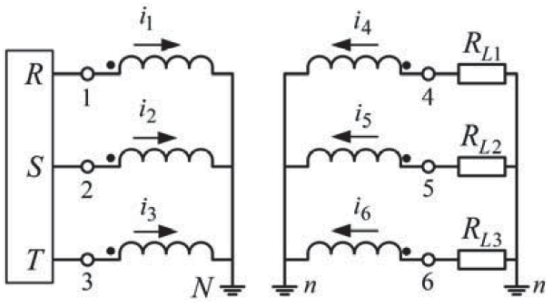


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема трехфазного трансформатора для случая соединения обмоток YNyn0 и при резистивной нагрузке

Целью данной работы является разработка имитационной модели и диагностирование на ее основе дефектов обмоток трехфазных трансформаторов в среде MATLAB/Simulink.

Рассмотрим основные идеи расширенного анализа вектора Парка – EPVA (The Extended Park's Vector Approach). Этот метод основан на анализе кривой годографа и спектре его модуля [2–3, 7]. В соответствии с этим подходом вначале определяют ток намагничивания трансформатора при нагрузке. Для этого сигналы тока намагничивания при нагрузке вычисляются путем сложения токов первичной и вторичной обмоток на первичной стороне. Для случая соединения обмоток *YNyn*0 (рис. 2) токи намагничивания при нагрузке:

$$\begin{aligned} i_{11} &= i_1 + i_4 \cdot N_2 / N_1, \\ i_{22} &= i_2 + i_5 \cdot N_2 / N_1, \\ i_{33} &= i_3 + i_6 \cdot N_2 / N_1, \end{aligned} \qquad (1)$$

где N_1 и N_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

Для других случаев соединения обмоток трансформатора выражения для токов намагничивания при нагрузке могут быть получены с использованием того же основного принципа, но по другим выражениям [2].

Затем для получения годографа $i_d + f(i_q)$ вычисляются компоненты вектора Парка тока трансформатора при нагрузке (i_d, i_q) в осях d-q в соответствии с выражениями [2, 3, 7]:

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{11} - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{22} - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{33}, \quad i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{22} - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{33}. \qquad (2)$$

При расширенном подходе на основе вектора Парка (EPVA) тока дополнительно выполняется спектральный анализ переменной составляющей модуля вектора Парка тока:

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \qquad (3)$$

При контроле девиации полученного годографа $i_d + f(i_q)$ от ожидаемого могут быть легко обнаружены условия дефекта.

Известно, что при идеальных условиях и резистивной трехфазной нагрузке компоненты вектора Парка:

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin(\omega t), \quad i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \qquad (4)$$

где I – максимальное значение возбуждающего тока нагрузки (А), ω – угловая частота питающей сети (рад / с) и t – переменная времени.

В этом случае годограф представляет собой окружность с диаметром, равным $\sqrt{6}\, I / 2$. Поэтому, если d и q составляющие тока подать на входы X и Y графопостроителя (осциллографа), то траектория движения луча на экране представляет собой окружность с центром в начале координат. При этом спектр модуля вектора Парка тока содержит только постоянную составляющую тока.

В случае дефекта уравнения (4) больше не действительно, и, следовательно, наблюдаемая картина отличается от эталонного годографа.

При неисправности в первичной обмотке в виде короткозамкнутых витков они выступают как нагрузка автотрансформатора для первичной обмотки. При дефекте во вторичной обмотке короткозамкнутые витки действуют как обычная дополнительная вторичная обмотка [2, 3]. В обоих случаях возникновение межвитковых коротких замыканий обмоток приводит к росту величины тока намагничивания при нагрузке в пораженной фазе по сравнению с работой без дефекта, что приводит к несбалансированной системе токов. В этом случае годограф вектора Парка тока при нагрузке меняется по форме от окружности до эллипса, а модуль вектора Парка содержит, кроме доминирующей компоненты постоянного тока, и компоненту переменного тока с удвоенной частотой питания 2*f*. Эта компонента спектра непосредственно связана с асимметрией трансформатора, чем больше дефект, тем выше ее амплитуда. При этом форма годографа – эллипс, величины осей которого, а также угол наклона большей оси эллипса к положительной оси координат X зависят от тяжести дефекта и сочетания дефектов в фазах, как это видно из экспериментальных кривых на рис. 3, приведенных из работы [2].

Чем выше процент закороченных витков в первичной обмотке, чем выше ток, тем тяжелее дефект и длиннее большая ось эллипса. При этом годографы вектора Парка при работе без дефекта (healthy) отличаются от ожидаемой формы для идеальной ситуации (окружности) из-за нелинейности магнитопровода и асимметрии магнитной цепи (см. рис. 3, 4). Это известное явление, которое вызывает несбалансированный и искаженный характер токов при нагрузке. Аналогичные расчетные формы годографов при работе без дефекта изображены на рис. 3 и были получены при цифровом моделировании годо-

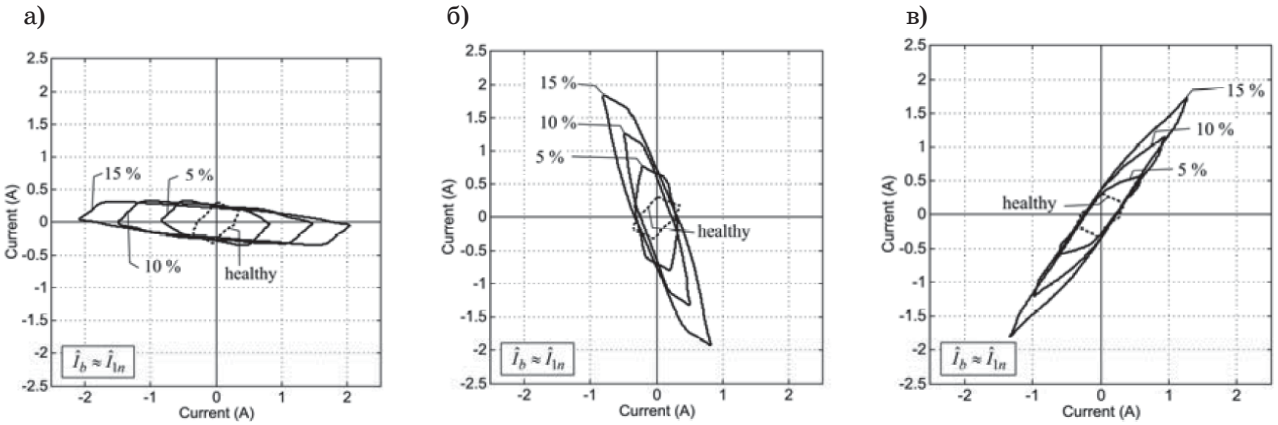


Рис. 3. Экспериментальные годографы вектора Парка тока при сбалансированной резистивной нагрузке и соединении обмоток YNyn0 для различных неисправных фаз: а – фаза R; б – фаза S; в – фаза T

графов вектора Парка тока трансформатора на основе двух эквивалентных схем замещения его магнитной и электрической цепи.

Более подробную информацию о теоретических принципах, связанных с EPVA, можно найти в [2, 3, 7].

При экспериментальном диагностировании дефектов работы трансформаторов также необходимо учитывать параметры питающей сети, характер нагрузки, пульсации, обусловленные переключением вентилей, если трансформатор питается от преобразователя. При моделировании, в отличие от экспериментального исследования, используются идеальные модели, что позволяет только в первом приближении показать диагностические признаки дефектов. В случае необходимости, используя уточненную модель трансформатора, можно учесть неучтенные параметры и оценить их влияние на вид годографов и спектральный состав векторов Парка.

Имитационное моделирование наиболее просто можно выполнить на основе библиотечных моделей трансформаторов, так как в них имеются модели с различными схемами соединения обмоток и возможностью задать параметры магнитопровода [8]. Кроме этого, возможно промоделировать временные зависимости тока и напряжения, что особенно важно на этапе изучения переходных режимов работы и дефектов в работе трансформатора.

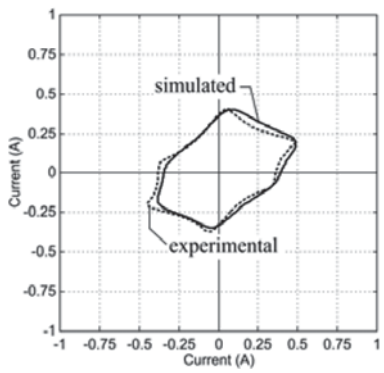


Рис. 4. Годографы вектора Парка тока при соединении обмоток YNyn0 и работе без дефекта

При создании имитационной модели моделирования дефектов в известную библиотечную модель трехфазного трансформатора необходимо ввести блоки, позволяющие осуществить сложение фазных токов трансформатора, приведение их к первичной стороне в соответствии с выражениями (1) и получение составляющих вектора Парка тока в осях d и q.

Для реализации вышесказанного модель трехфазного трансформатора дополнительно дополнена сумматорами, блоками умножения и суммирования сигналов для получения сигналов тока намагничивания с учетом токов нагрузки. Последнее позволит построить годографы векторов Парка этих величин и выполнить их спектральный анализ.

Кроме этого, для моделирования дефектов вводим два трехфазных блока: короткозамыкатель (3 – *Phase Fault*) и выключатель (3 – *Phase Breaker*) [7, 8]. Данные блоки позволяют моделировать неисправности трансформатора в виде различных коротких замыканий, а также обрывов фаз трансформатора. Кроме этого, дополнительно включаем два мультиплексора (*Mux*) и графопостроитель (*XY Graph 1*), с помощью которого наблюдаем годографы тока $i_d + f(i_q)$. Причем продольные составляющие подаются на вертикальные, а поперечные – на горизонтальные входы графопостроителя (*XY Graph 1*).

Блоки измерения активной и реактивной мощности в первичной и во вторичной обмотке трансформатора позволяют оценить потребляемую трансформатором мощность в зависимости от режима работы. Кроме этого, введены 4 осциллографа для регистрации кривых токов и напряжений трансформатора, а также вектора Парка тока и его d и q составляющих.

На рис. 5 приведена разработанная модель диагностирования дефектов трансформатора на

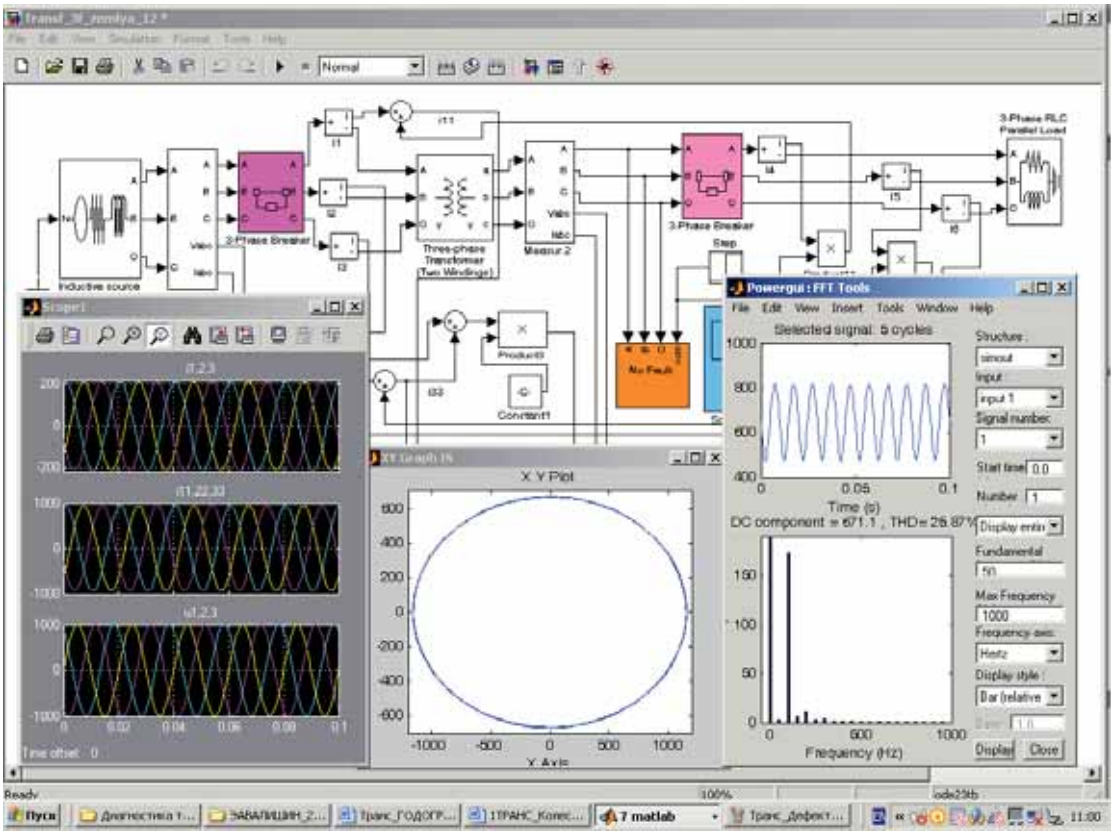


Рис. 5. Модель диагностирования дефектов трехфазного трансформатора с помощью расширенного подхода на основе вектора Парка тока

основе вектора тока Парка с наложенными экранами: слева – временные зависимости токов на первичной и вторичной обмотке трансформатора и выходного напряжения, в центре – годограф вектора Парка тока при работе без дефекта; справа – его спектр, полученный с помощью блока *Powerqui*.

Процесс имитации работы трансформатора включает следующие этапы:

1. Включение и выход на рабочий режим работы трансформатора (переходный процесс);

2. Работа с трансформатором под нагрузкой (установившийся режим);

3. Возникновение дефекта в работе (переходный процесс);

4. Установившийся режим работы с дефектом.

Меняя время начала дефекта с помощью блока *Step*, можно диагностировать работу трансформатора в различных режимах, например во время включения или в установившемся режиме работы.

Использование простой библиотечной модели позволяет при диагностировании дефектов остановиться на наиболее значимых диагностических признаках. В случае необходимости, меняя модель трансформатора, можно учесть факторы, которые исключены в библиотечной модели.

Получение спектров, как известно, возможно только в установившемся режиме работы. Поэтому необходимо правильно задавать начальные

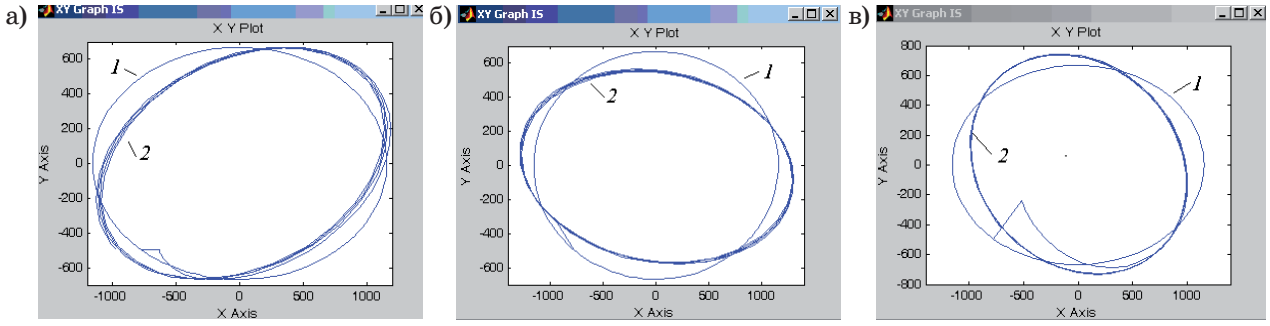


Рис. 6. Годографы векторов Парка тока при нагрузке трансформатора $i_d + f(i_q)$ при замыкании фазы на землю: а – фазы А; б – фазы В; в – фазы С

условия при моделировании данного этапа работы трансформатора. Использование годографов позволяет избежать этого. При этом имеется возможность не только проследить эволюцию вектора Парка тока, но и диагностировать дефект. Поэтому вначале необходимо определить дефект на основе годографов вектора Парка тока. Затем для различаемости диагностических признаков необходимо дополнительно провести спектральный анализ полученных векторов Парка тока.

На основе разработанной модели было проведено моделирование следующих режимов работы: без дефекта, с дефектами в виде междуфазных коротких замыканий обмоток трансформатора, замыканий обмоток фаз на землю, несимметричность обмоток, обрывы обмоток.

На рис. 6 для примера изображены годографы при моделировании дефекта в виде короткого замыкания фазы *A*, *B, C* на землю. При этом кривые *1* соответствуют годографам при работе без дефекта, *2* – годографам при работе с дефектом.

Результаты моделирования дефектов работы трансформатора в виде годографов были собраны в базы данных, на основе которых можно диагностировать возникшие дефекты.

Выводы

1. Предложенная имитационная модель трансформатора позволяет выполнить моделирование дефектов, оценить их влияние на работу трансформатора, а также диагностировать возникающие дефекты без специально препарируемого трансформатора и дорогостоящего оборудования, необходимого для экспериментального исследования.

2. На основе разработанной модели возможно исследовать рабочие характеристики и переходные процессы, наблюдая, как режимы работы влияют на временные зависимости, что позволяет глубже исследовать происходящие процессы в трансформаторах, которые вызывают трудности при их изучении.

3. Разработанную имитационную модель трансформатора и методику диагностирования дефектов удобно использовать при дистанционном обучении студентов или инженеров, проходящих переподготовку, когда отсутствует возможность работы на реальных стендах.

Библиографический список

1. *J. M. Pinto* et al. Non Intrusive Solution for Power Transformers Real Time Monitoring Using an Hybrid Park's Vector and Model-Based Approach // 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon. 15–18 June. 2015. 476 pp.

2. *Oliveira L. M. R, Cardoso A. J. M, Cruz S. M. A.* Power Transformers Winding Fault Diagnosis by the On-Load Exciting Current Extended Park's Vector Approach // Electric Power Systems Research. June, 2011. Vol. 81. P. 1206–1214.

3. *Oliveira L. M. R, Cardoso A. J. M*. Comparing Power Transformer Turn-to-Turn Faults Protection Methods: Negative Sequence Component Versus Space Vector Algorithm // IEEE Trans. On Ind. Appl. 2015. P. 289–295.

4. *Кузьмин О. А.* Современные методы диагностики силовых трансформаторов [Электронный ресурс]. URL: http://forca.ru/stati/podstancii/sovremennye-metody-diagnostiki-silovyh-transformatorov.html.

5. *Вилков С. А.* Обзор современных способов диагностирования силовых трансформаторов и автотрансформаторов [Электронный ресурс]. URL: http://web.snauka.ru/issues/2012/09/16794.

6. *Попов Г. В.* Вопросы диагностики силовых трансформаторов. Иваново: ФГБОУВПО, Ивановский госуд. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2012. 176 с.

7. *Колесников В. В.* Моделирование дефектов асинхронных двигателей в среде MATLAB / Simulink // Завалишинские чтения'14: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2014.

8. *Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А.* Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. СПб.: Корона принт, 2003. 256 с.

УДК 622.276.656, 621.365

С. Г. Конесев
кандидат технических наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет

Э. Ю. Кондратьев
главный энергетик
ООО «Газпром добыча Ямбург»

Р. Т. Хазиева
старший преподаватель, аспирант
Уфимский государственный нефтяной технический университет

А. А. Конев
магистрант
Уфимский государственный нефтяной технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИНДУКТОРОВ

Авторами выполнено исследование эффективности нагрева с помощью одиночных индукторов в проводном и ленточном исполнении, используемых в качестве ступеней для построения локально-ступенчатой индукционной нагревательной системы, на основе разработанных компьютерных моделей в программе ELCUT 6.0, адекватность которых подтверждена экспериментально. Эксперименты проведены на макетном образце индукционной нагревательной системы трубопровода с расположенными на нем ленточным и проводным индукторами. Показано, что при одних и тех же параметрах (значениях индуктивности и числа витков) ленточный индуктор, выполненный в виде МИЭК, за 10 минут нагревает до большей температуры (на 5,08%), чем индуктор в проводном исполнении.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, оценка тепловых потерь, высоковязкие нефти, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, электротермическое воздействие, индукционная нагревательная система, тепловые потери, математическая модель, трубопровод, экспериментальное подтверждение.*

S. G. Konesev
PhD, Tech., Assistant Professor
Ufa State Petroleum Technological University

E. Yu. Kondratyev
Chief Power Engineer
“Gazprom Dobycha Yamburg”

R. T. Khazieva
Senior Lecturer, PhD Student
Ufa State Petroleum Technological University

A. A. Konev
Postgraduate Student
Ufa State Petroleum Technological University

THE RESEARCH OF INDUCTORS EFFICIENCY

The authors performed a study of the heating efficiency with the help of single inductors in wire and tape design, used as steps for constructing a locally-step induction heating system, based on the developed computer models in the ELCUT 6.0 program, the adequacy of which is confirmed experimentally. The

experiments were carried out on a induction heating system prototype of the pipeline with tape and wire inductors located on it. It is shown that for the same parameters (inductance values and number of turns), a tape inductor made in the form of MIEKs heats up to a higher temperature (by 5.08%) for 10 minutes than the inductor in a wire version.

Keywords: *induction heating, estimation of heat loss, high-viscosity oil, multifunction integrated electromagnetic component, electrothermal effects, induction heating system, heat loss, mathematical model, pipeline, experimental confirmation.*

Анализ динамики патентования методов и устройств регулирования реологических свойств высоковязкой нефти на основе международных патентных баз и патентных баз России показал интерес ведущих компаний мира к разработке новых технологий и устройств регулирования реологических свойств аномальных нефтей [1, 2]. Объекты нефтегазовой отрасли требуют обеспечения работы нагревательных систем: при добыче и транспортировке высоковязкой нефти требуется оказывать тепловое воздействие для снижения вязкости, облегчения процесса перекачки, снижения нагрузки на насосы и приводы [3, 4]. Наиболее эффективными и безопасными нагревательными системами в этом случае являются электротермические системы [5, 6]. К ним относятся кабельные (резистивные) системы, индукционно-резистивные системы skin-systems для попутного поддержания температуры, а также индукционные нагревательные системы, работающие на промышленной и среднеповышенной частотах [7–10]. Преимуществами применения таких систем являются высокая энергетическая эффективность, возможность локализации места нагрева, простота монтажа и эксплуатации [11–13].

К электротермическим системам (ЭТС), применяемым на объектах нефтегазовой отрасли, предъявляются следующие требования:

– обеспечение двух режимов: поддержания температуры и аварийного разогрева;

– глубокое регулирование мощности;

– обеспечение автоматизации и реализация малолюдных технологий;

– функционирование ЭТС при ограничении электроснабжения [14–16].

Применение индукционных нагревательных систем, работающих на среднеповышенных частотах (ИНС) предпочтительнее, поскольку они имеют лучшую управляемость процессами передачи тепловой мощности, необходимую при различных условиях перекачки нефти по сравнению с системами, работающими на промышленной частоте [17–20].

Индукционные нагревательные системы представляют собой индуктор и источник питания со звеном повышенной частоты [21–23]. Изменяя частоту коммутаций, можно регулировать мощность ИНС, а следовательно, температуру и объем перекачиваемой жидкости [24–26].

Применение ИНС позволяет реализовать следующие основные способы нагрева трубопрово-

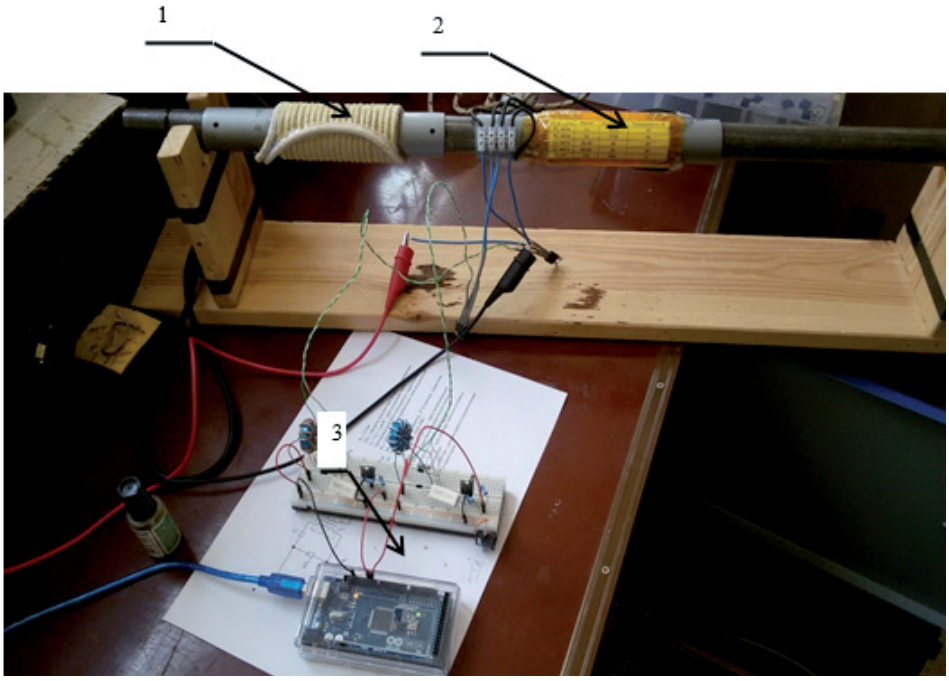


Рис. 1. Экспериментальный макет проводного и ленточного индукторов: 1 – проводной индуктор; 2 – индуктор в ленточном исполнении; 3 – система управления

дов: локальный, попутный, локально-попутный, локально-ступенчатый. Наиболее эффективным с точки зрения надежности и простоты монтажа является способ локально-ступенчатого нагрева, заключающийся в нескольких интенсивных подогревах вязкой текучей среды на коротких участках трубопровода [27–29].

Данный способ реализуется предложенной авторами системой (устройством) локально-ступенчатого нагрева, содержащей источник питания, систему управления, нагревательные элементы, размещенные на трубопроводе с интервалами, определяемыми температурным режимом и технологическим процессом перекачки [28]. Нагревательные элементы выполнены в виде многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов (МИЭК) [30] и размещены на трубопроводе с интервалами, определяемыми температурным режимом и технологическим процессом перекачки (экспериментальный макет представлен на рис. 1). Проводящие обкладки МИЭК выполняют роль индуктора.

Устройство работает с сопроводительной сетью и может получать питание по двум проводам от положительного и отрицательного полюсов источника питания. Положительный полюс источника питания подключен к началу первой обкладки нагревательного элемента, отрицательный полюс источника питания подключен к концу второй обкладки нагревательного элемента. Для каждого нагревательного элемента дополнительно введен коммутатор, подключенный к концу первой и к началу второй обкладки нагревательного элемента. Вариантом исполнения является устройство, у которого отрицательный полюс источника питания и конец второй обкладки нагревательного элемента электрически соединены с трубопроводом [28].

Для оценки эффективности применения данного способа регулирования реологических свойств высоковязкой нефти необходимо изучить тепловые, электродинамические и механические процессы, происходящие в нагревательных элементах ИНС локально-ступенчатого нагрева.

Актуальной задачей является исследование эффективности нагрева с помощью одиночных индукторов в проводном и ленточном исполнении, используемых в качестве ступеней для построения локально-ступенчатой системы нагрева.

Авторами разработаны компьютерные модели ленточного и проводного индукторов, проведено их сравнение по эффективности нагрева в зависимости от различных параметров в программе ELCUT 6.0.

Для моделирования в программе ELCUT 6.0 требуется задать геометрические данные индукторов. Обмотки индуктора в ленточном исполнении выполнены из медной пленки толщиной 20 мкм, шириной 10 см, в качестве изоляции использовалась полиимидная пленка толщиной 12 мкм, шириной 11 см. Обмотка проводного индуктора выполнена из медного провода сечением 2 мм^2.

В таблице представлены показатели нагрева трубы, полученные в ходе моделирования при заданных параметрах (U = 40 В, f = 100 кГц (для ленточного индуктора), f = 50 Гц (для проводного индуктора), число витков = 23).

В результате моделирования получены данные о характеристиках нагрева для проводного и ленточного индукторов, которые представлены на рис. 2.

Адекватность разработанной модели подтверждена экспериментально. Температура снималась с помощью цифровых датчиков типа dht22, расположенных на трубе по центру каждого индуктора. Данные с датчиков фиксировались в течение десяти минут. Наибольшее расхождение результатов, полученных в ходе экспериментов, по сравнению с результатами, полученными в ходе моделирования, составило 6,2%.

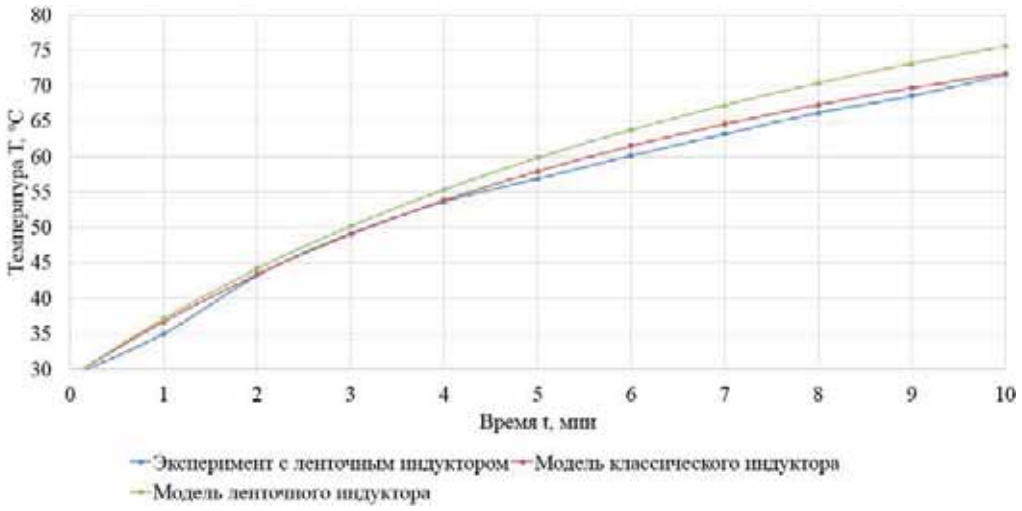


Рис. 2. Результаты по эффективности нагрева трубы, полученные в ходе экспериментов и моделирования

Таблица 1

Сравнение данных, полученных в ходе моделирования при $U = 40$ В, $f = 100$ кГц, $n = 23$

Время, мин	Температура нагрева трубы под индуктором, °С		
	Модель проводного индуктора	Модель ленточного индуктора	Эксперимент с ленточным индуктором
0	29	29	29
1	36,78	37,19	35,06
2	43,37	44,16	43,25
3	48,99	50,14	49,13
4	53,79	55,31	53,63
5	57,92	59,82	56,88
6	61,49	63,77	60,13
7	64,59	67,25	63,19
8	67,29	70,35	66,19
9	69,67	73,12	68,56
10	71,76	75,6	71,56

Эксперименты проведены на макетном образце ИНС трубопровода, представляющем собой участок трубы с расположенным на нем ленточным индуктором и проводным индуктором. В табл. 1 приведены среднестатистические данные серии экспериментов с ленточным индуктором.

С помощью разработанной модели произведена оценка характера нагрева трубы с помощью ленточного и проводного индукторов в зависимости от различных параметров. Показано, что при одних и тех же параметрах (значении индуктивности, числе витков) ленточный индуктор, выполненный в виде МИЭК, за 10 минут нагревает до большей температуры (на 5,08%), чем проводной индуктор.

Библиографический список

1. Анализ динамики патентования методов и устройств регулирования реологических свойств высоковязкой нефти на основе энергосберегающих индукционных технологий / *С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева, П. А. Хлюпин, Э. Ю. Кондратьев* // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. 2013. № 5. С. 179–189. URL: http://www.ogbus.ru/authors/KonesevSG/KonesevSG_1.pdf (дата обращения: 14.01.2014).

2. Химические аппараты с индукционным обогревом / С. А. Горбатков, А. Б. Кувалдин, В. Е. Минеев, В. Е. Жуковский. М.: Химия, 1985. 176 с.

3. Пат. РФ на изобретение № 2205523 от 27.05.2003. Высокостабильный индукционный проточный нагреватель / Н. И. Богатырев, Р. Д. Тлиш, Н. В. Силяева и др. Бюл. 15.

4. *Matsen M. R., Gregg P. S., Martinson H., Snyder R.* Method and Apparatus for Cosolidating Organic Matrix Composites Using Induction Heating // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1997. Т. 28. № 2. P. 193.

5. *Конесев С. Г., Макулов И. А., Мамаев Н. М.* Применение систем среднечастотного индукционного нагрева при транспортировке нефтепродукта // Нефтегазовое дело. 2008. Т. 6. № 2. С. 75–80.

6. *Конесев С. Г., Макулов И. А.* Промышленные системы индукционного обогрева технологических трубопроводов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. 2007. С. 117–126.

7. *Sturman P., Gray R. A.* Induction Heating of Polymer Matrix Composites in a Mold Press // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1996. Т. 27. № 11. P. 1109–1110.

8. Пат. РФ на изобретение № 2304369 от 10.08.07. Индукционное нагревательное устройство для текучей среды / М. М. Семенов, М. М. Батищев. Бюл. 22.

9. *Sahin A. Z.* Direct Resistance and Induction Heating of a Slab with Convective Surfaces // Heat and Mass Transfer. 1996. Т. 32. № 1–2. P. 133–139.

10. *Конесев С. Г., Хлюпин П. А., Макулов И. А.* Проблемы и способы решения трубопроводного транспорта вязкой нефти // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. (с междунар. участием). 2009. Т. 2. С. 16–20.

11. *Конесев С. Г., Магзюмов В. М., Садиков М. Р.* Моделирование индукционного нагрева промыслового трубопровода // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. (по материалам науч.-техн. семинара с междунар. участием). 2012. С. 168–177.

12. *Конесев С. Г., Хлюпин П. А., Садиков М. Р.* Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. тр. III Всерос. науч.-техн. конф. (с междунар. участием). 2011. С. 212–219.

13. Пат. РФ на полезную модель № 109949 от 27.10.11. Индукционный котел / С. С. Дивятовский. Бюл. № 7.

14. Пат. РФ на полезную модель № 21709 от 27.01.02. Индукционный нагреватель жидкости / А. И. Елшин, В. М. Казанский. Бюл. № 20.

15. Пат. РФ на полезную модель № 2301378 от 20.06.07. Индукционный нагреватель жидкости / Ю. В. Зверев, А. Н. Лапин, Ю. Б. Цыкарев. Бюл. № 17.

16. Investigation of Induction Period and Morphology of CACO3 Fouling on Heated Surface / Q. Yang, Y. Liu, A. Gu and etc. // Chemical Engineering Science. 2002. Т. 57. № 6. P. 921–931.

17. Пат. РФ на полезную модель № 48139 от 10.09.05. Индукционный нагреватель текучей среды трансформаторного типа / В. А. Петров, П. О. Воронов. Бюл. 22.

18. Monitoring Density and Temperature in c/c Composites Processing by cvi with Induction Heating / *D. Leutard, G. L. Vignoles, F. Lamouroux, B. Bernard* // Journal of Materials Synthesis and Processing. 2001. Т. 9. № 5. P. 259–273.

19. Пат. РФ на полезную модель № 80085 от 20.01.09. Индукционный нагреватель текучих сред / А. Н. Брагин, В. А. Бардокин. Бюл. 2.

20. *Sadeghipour K., Dopkin J. A.* A Computer Aided Finite Element / Experimental Analysis of Induction Heating Process of Steel // Computers in Industry. 1996. Т. 28. № 3. P. 195–205.

21. Пат. РФ на изобретение № 2138137 от 20.09.99. Индукционный нагреватель текучих сред / В. А. Черепанов. Бюл. 35.

22. Electrochemical Behaviour of Dsa Type Electrodes Prepared by Induction Heating / Mousty C., Foti G., Comninellis C., Reid V. // Electrochimica Acta. 1999. Т. 45. № 3. P. 451–456.

23. *Rudolf R., Mitschang P., Neitzel M.* Induction Heating of Continuous Carbon-Fibrereinforced Thermoplastics // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2000. Т. 31. № 11. P. 1191–1202.

24. *Mocho P., Bourhis J. C., Le Cloirec P.* Heating Activated Carbon by Electromagnetic Induction // Carbon, 1996. Т. 34. № 7. P. 851–856.

25. *Pal D., Venkataraman V.* A Portable Battery-Operated Chip Thermocycler Based on Induction Heating // Sensors and Actuators A: Physical. 2002. Т. 102. № 1–2. P. 151–156.

26. Пат. РФ на изобретение № 2263418 от 27.10.05. Индукционный нагреватель текучих сред / Е. Д. Карманов, С. И. Шаплов. Бюл. 30.

27. Индукционные нагревательные системы для протяженных нефтепроводов / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева, Р. В. Кириллов и др. // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. № 4. С. 40–47.

28. Пат. РФ на изобретение № 2584137 от 20.05.2016. Способ электротермического воздействия на протяженные трубопроводы и индукционная нагревательная система для его реализации / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева, Р. В. Кириллов и др. БИ № 14.

29. Пат. РФ на полезную модель № 154768 от 10.09.2015. Труба для транспортировки вязких текучих сред / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева, Р. В. Кириллов, Э. Ю. Кондратьев. БИ № 25.

30. Пат. РФ на изобретение № 2585248 от 27.05.2016. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент / С. Г. Конесев. БИ № 12.

УДК 621.825

***В. Д. Косулин*[1]**
кандидат технических наук, доцент

***И. А. Салова*[2]**
кандидат технических наук, доцент
[1,2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ МУФТ В НЕМАГНИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Предложена методика расчета магнитных муфт в немагнитных конструкциях. Представлены 2D-модели магнитных муфт для расчета методом конечных элементов.
Ключевые слова: *магнитная муфта, моделирование, метод конечных элементов.*

***V. D. Kosulin*[1]**
PhD, Tech., Associate Professor

***I. A. Salova*[2]**
PhD, Tech., Associate Professor
[1,2]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ANALYTICAL CALCULATION OF MAGNETIC COUPLING IN NON-MAGNETIC STRUCTURES

The article proposes method calculation method of the magnetic coupling in the non-magnetic structures. 2D models of the magnetic coupling to the finite element calculation method is presented in this paper.
Keywords: *magnetic coupling, modeling, finite element method.*

Магнитные муфты широко применяются в циркуляционных насосных системах для перекачивания экологически опасных и агрессивных жидкостей в химической, нефте- и газоперерабатывающей, пищевой, фармацевтической и др. отраслях промышленности. В них магнитное поле создается постоянными магнитами (NdFeB и SmCo), установленными в ведущей и ведомой полумуфтах. Защитный экран, находящийся между полумуфтами, обеспечивает герметичность перекачиваемой субстанции [1–4].

Обычно в каждой полумуфте магниты устанавливаются на магнитопроводы из электротехнической стали, что способствует снижению сопротивления магнитному потоку и увеличению индукции в рабочем зазоре. Однако в ряде случаев по условиям эксплуатации применение электротехнической стали невозможно. Тогда магниты устанавливаются в обоймы, выполненные из немагнитного материала: нержавеющей стали или алюминия.

При этом следует отметить, что некоторые сорта нержавеющей стали в результате механической обработки приобретают магнитные свойства. Относительная магнитная проницаемость может достигать значений $\mu = (5–10)$. Это приводит к перераспределению магнитных потоков в системе: сопротивление магнитному потоку наружной и внутренней обойм становится меньше, чем сопротивление соответствующих воздушных промежутков, что может привести к увеличению рабочего потока в воздушном зазоре. Наряду с этим наличие сепаратора между наружной и внутренней обоймами приводит в случае проявления магнитных свойств к «отсасыванию потока», что эквивалентно увеличению потока рассеяния. Это, в свою очередь, приводит к снижению полезного магнитного потока. Таким образом, можно предположить наличие взаимной компенсации от влияния магнитных свойств отдельных участков магнитной цепи на величину полезного потока. Учитывая сказанное, в дальнейшем принимаем значение относительной магнитной проницаемости материалов конструкции муфты $\mu = 1$.

Магнитная система муфты показана на рис. 1, *а*. Постоянные магниты (показаны штриховкой) намагничены радиально (*N*-*S*). В воз-

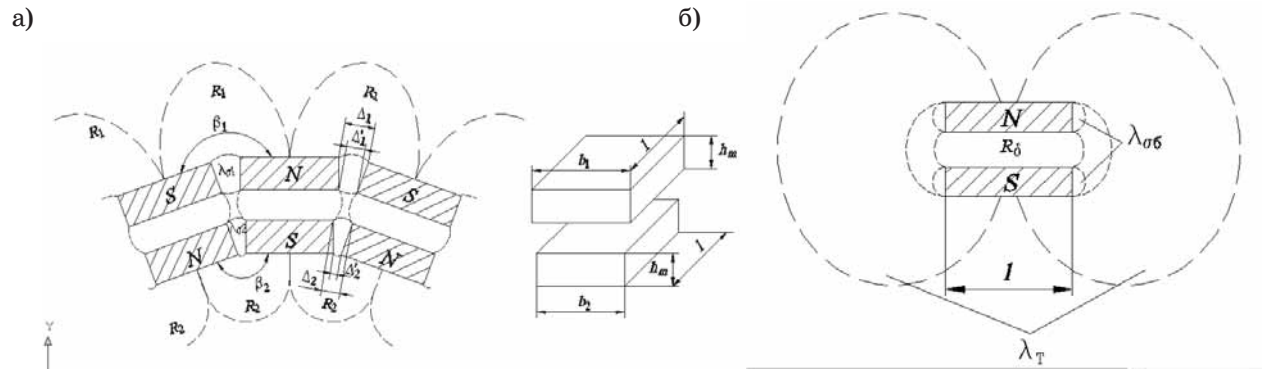


Рис. 1. Распределение магнитных потоков по взаимно перпендикулярным плоскостям

душном зазоре между магнитами наружной и внутренней обойм установлена герметичная гильза сепаратора (на рис. 1 не показана) из немагнитного материала ($\mu = 1$). Все конструктивные элементы опущены и заменены воздушными промежутками. На рис. 1 также указаны: h_m – высота постоянного магнита; b_1, b_2 – ширина постоянных магнитов наружной и внутренней обойм соответственно; l – осевой размер муфты; $\Delta_1, \Delta_1', \Delta_2, \Delta_2'$ – расстояния между боковыми гранями магнитов верхней (1) и нижней (2) обойм.

Выражение для момента магнитной муфты в функции угла относительного поворота внутренней и наружной обойм имеет вид [5]:

$$M = \frac{p\pi Dl\delta}{2\mu_0} B_{\delta m}^2 \sin\Theta,$$

где D – диаметр средней окружности рабочего немагнитного зазора δ; Θ – электрический угол поворота внутренней обоймы относительно внешней ($\Theta = p\Theta'$, здесь Θ' – пространственный угол поворота); $B_{\delta m}$ – максимальное значение индукции в середине воздушного зазора δ при холостом ходе муфты ($\Theta = 0$); p – число пар полюсов; l – длина магнита в осевом направлении; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Данное выражение содержит максимальное значение индукции, для определения которого требуется знать распределение индукции по углу $B(\Theta')$, что требует решения полевой задачи. Для инженерной практики такой расчет встречает определенные трудности, поскольку требует применения пакетов прикладных программ, что не всегда возможно и целесообразно. Рассмотрим метод, основанный на использовании схем замещения магнитных цепей, который позволит на этапе предварительного расчета магнитной муфты оценить с известной степенью точности величину момента срыва муфты с использованием интегральной характеристики магнитного поля – магнитного потока. Для этого в выражении для момента муфты перейдем к среднему значению индукции и, соответственно, к магнитному потоку Φ_δ, замыкающемуся между полюсами полумуфт в режиме холостого хода:

$$M = \frac{2p^3 \Phi_\delta^2 \delta}{\mu_0 D\pi l \alpha_\tau^2} \sin\Theta,$$

где $\alpha_\tau \approx b_{ср}/\tau$ – коэффициент полюсного перекрытия; здесь $b_{ср}$ – средняя величина дуги постоянных магнитов внутренней и наружной обойм; τ – полюсное деление ($\tau = \pi D/2p$).

Для расчета магнитного потока построим схему замещения магнитной цепи и проведем ее расчет.

На конструктивной схеме магнитной цепи устройства определяем возможные пути замыкания потоков постоянных магнитов, выделяя потоки рассеяния и основной рабочий поток. По путям замыкания потоков выделяются участки, отличающиеся по величине магнитной проницаемости (участки со сталью и воздушные промежутки). Для каждого участка рассчитывается магнитная проводимость (или магнитное сопротивление) и составляется схема замещения. При этом схема замещения составляется для основного рабочего потока, а влияние потоков рассеяния учитывается коэффициентами приведения для параметров постоянных магнитов.

На рис. 1 для модели рассматриваемой конструктивной схемы муфты штриховыми линиями условно обозначены границы вероятных путей прохождения соответствующих магнитных потоков в системе.

Магнитный поток каждого постоянного магнита состоит из двух составляющих: полезный магнитный поток, проходящий через воздушный зазор с магнитным сопротивлением R_δ, и потоки рассеяния по путям с магнитными проводимостями $\lambda_{\sigma 1}$, $\lambda_{\sigma 2}$ и $\lambda_{\sigma b}$. Потоки рассеяния не участвуют в создании полезного потока и могут быть исключены из рассмотрения введением коэффициентов приведения k_σ. Расчет данной магнитной системы отличается от расчета системы, содержащей участки со сталью, так как не требует учета насыщения стальных участков, которое делает задачу нелинейной.

В данном случае возможно использование формул для расчета магнитных проводимостей воздушных промежутков наиболее распространенных конфигураций известными метода-

ми [6]. Основной рабочий магнитный поток на внешних гранях наружной и внутренней обойм замыкается по путям воздушных промежутков с магнитными сопротивлениями R_1, R_2 и $R_т = 1\lambda_т$ (рис. 1). Тогда можно считать, что полезный магнитный поток каждой пары магнитов, проходящий через воздушный зазор, складывается из двух составляющих:

– поток в плоскости, перпендикулярной оси муфты (рис. 1, *а*);

– поток в плоскости, проходящей через ось муфты (рис. 1, *б*).

Геометрия муфты такова, что сопротивления R_1, R_2 и $R_т = 1/\lambda_т$ соизмеримы, а это значит, что оба магнитных потока (поперечный и продольный) участвуют в создании рабочего магнитного потока.

Рассмотрим принцип расчета коэффициента приведения k_σ, учитывающего изменение расчетных параметров постоянных магнитов при исключении потоков рассеяния.

Если для какого-либо магнита в простейшей магнитной системе представить схему замещения (рис. 2, *а*), то она будет включать в себя четыре элемента:

– собственно источник МДС (F_m) – постоянный магнит;

– магнитное сопротивление R_m постоянного магнита;

– магнитное сопротивление R_s рассеяния;

– магнитное сопротивление R_d воздушного зазора для основного (полезного) потока.

Проведем два очевидных преобразования:

– источник МДС преобразуем в источник тока и объединим сопротивления R_m R_s в одно как включенные параллельно: $R' = \dfrac{R_m R_\sigma}{R_m + R_\sigma}$;

– источник тока преобразуем обратно в источник МДС F'_m с внутренним сопротивлением $R' = \dfrac{R_m R_\sigma}{R_m + R_\sigma}$.

Введем коэффициент приведения $k_\sigma = 1 + \dfrac{R_m}{R_\sigma}$.

Тогда справедливы следующие соотношения: $F'_m = \dfrac{F_m}{k_\sigma}$; $R'_m = \dfrac{R_m}{k_\sigma}$, а преобразованная схема приобретает вид, как на рис. 2, *б*.

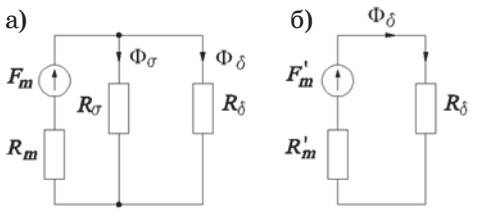


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи постоянного магнита

Данное преобразование позволило исключить проводимости рассеяния при составлении расчетной схемы замещения магнитной цепи, заменив параметры постоянного магнита на приведенные. Заметим, что

$$F_m = h_m H_C;\ R_m = \frac{h_m H_C}{S_m B_r} = \frac{h_m}{S_m \mu_r \mu_0},$$

где h_m – длина магнита в направлении намагниченности; S_m – площадь нейтрального сечения магнита; B_r – остаточная индукция магнита, H_c – коэрцитивная сила; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала постоянного магнита.

С учетом связи между магнитным сопротивлением и магнитной проводимостью коэффициент приведения можно рассчитать и через соответствующие магнитные проводимости:

$$k_\sigma = 1 + \frac{\lambda_\sigma}{\lambda_m}.$$

Для одноконтурной магнитной цепи (рис. 2, *б*) магнитный поток Φ_δ найдем из очевидного соотношения:

$$\Phi_\delta = \frac{F'_m}{R_\delta + R'_m}.$$

С учетом распределения магнитных потоков в рассматриваемой магнитной системе схема замещения имеет вид, как на рис. 3. Ввиду симметрии конструктивной схемы муфты и на основании первого закона Кирхгофа для магнитных цепей справедливо соотношение

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_\delta - \Phi_3}{2}.$$

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа для данной схемы:

$$\begin{cases} \Phi_\delta (R'_{m1} + R'_{m2} + R_\delta) + \Phi_3 R_T = F'_{m1} + F'_{m2} \\ \Phi_1 (R_1 + R_2) - 2\Phi_3 R_T = 0 \end{cases}.$$

Решая полученные уравнения относительно потока Φ_δ, получим

$$\Phi_\delta = \frac{4(F'_{m1} + F'_{m2})}{4(R'_{m1} + R'_{m2} + R_\delta) + (1 - k_T)(R_1 + R_2)},$$

где $k_\text{Т} = \dfrac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + 4R_\text{Т}}$.

Как следует из полученного выражения, на величину магнитного потока в воздушном зазоре оказывают влияние магнитные сопротивления участков как в поперечной плоскости (R_1, R_2), так и в продольной ($R_т$). Поскольку их величина определяется геометрией соответствующих воздушных промежутков, то возникает некоторая неопределенность в оценке площадей наружных граней постоянных магнитов для каждой составляющей магнитного потока. Для инженерных

расчетов предлагается следующий алгоритм расчета составляющих полезного потока на основе решения двух плоских задач, исходя из физической картины распределения магнитных потоков в рассматриваемой магнитной системе.

1. Решается плоская задача для схемы (рис. 1, *а*) и рассчитывается магнитный поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta 1}$ в пренебрежении потоками в другой плоскости. Тем самым фиксируется уровень сопротивления магнитной цепи поперечного контура магнитной системы.

2. Решается плоская задача для схемы (рис. 1, *б*) и рассчитывается магнитный поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta 2}$ в пренебрежении потоками в другой плоскости. Тем самым фиксируется уровень сопротивления магнитной цепи в продольном (осевом) контуре.

3. Из предположения, что распределение площадей в сечении постоянных магнитов для потоков Φ_1 и Φ_3 (рис. 3) в реальной системе соответствует соотношению между потоками, рассчитанными в пп. 1 и 2, производится корректировка сопротивлений R_1, R_2 и $R_т$, поскольку их величина обратно пропорциональна соответствующим площадям.

4. Производится расчет магнитного потока в воздушном зазоре по схеме замещения (рис. 3) с учетом скорректированной величины сопротивлений по п. 3.

Рассмотрим каждый из перечисленных пунктов алгоритма расчета.

1. Расчет магнитного потока $\Phi_{\delta 1}$.

Коэффициент приведения рассчитывается с учетом всех полей рассеяния по периметру постоянных магнитов, с тем чтобы приведенные значения МДС магнитов могли быть использованы как для расчета потоков $\Phi_{\delta 1}$ и $\Phi_{\delta 2}$, так и затем потока Φ_δ. При этом учитываются проводимости рассеяния $\lambda_{\sigma р}$ по ребрам постоянных магнитов между соседними боковыми гранями каждого магнита (проводимости сферических квадрантов на рис. 1, *а* не показаны) [6]. Поскольку расстояние между боковыми гранями магнитов может оказаться больше, чем половина h_m, то в этом случае в дополнение к проводимости $\lambda_{\sigma 1}$ между боковыми гранями соседних магнитов следует добавить проводимости рассеяния $\lambda_{\sigma б}$ по боковым граням каждого магнита [6]. Тогда проводимость рассеяния магнита верхней полумуфты определяется как сумма $\lambda_{\sigma В} = \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma б} + \lambda_{\sigma р}$.

Проводимость рассеяния между боковыми гранями найдем по формуле [7]:

$$\lambda_\sigma = \frac{k\Phi_\sigma}{2h_m H_c} = 0,5k\mu_0 \frac{lh_m}{\alpha_{ср}},$$

где k = 1,05–1,1 – коэффициент, учитывающий выпучивание силовых линий по пути замыкания потока рассеяния.

Проводимости $\lambda_{\sigma б}$ и $\lambda_{\sigma р}$ найдем по формулам [6]:

$$\lambda_{\sigma б} = 2{\cdot}0,26\mu_0(l + b_1); \lambda_{\sigma р} = 4{\cdot}0,77\mu_0 h_m.$$

Магнитная проводимость верхнего магнита $\lambda_{m1} = \frac{S_{m1}B_r}{h_m H_c}$.

Коэффициент приведения $k_{\sigma 1} = 1 + \frac{\lambda_{\sigma В}}{\lambda_{m1}}$; приведенная МДС верхнего магнита $F'_{m1} = \frac{h_m H_c}{k_{\sigma 1}}$; приведенное магнитное сопротивление верхнего магнита $R'_{m1} = \frac{h_m}{S_{m1}\mu_r\mu_0 k_{\sigma 1}}$.

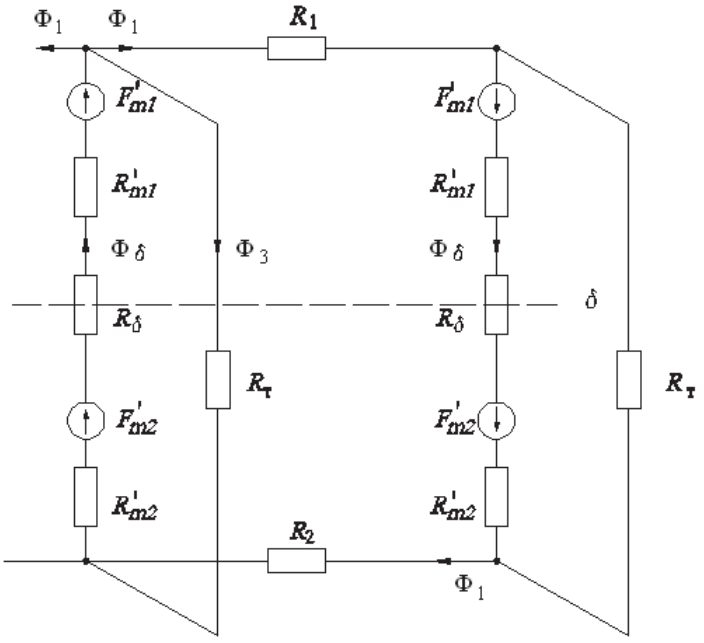


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи муфты

Аналогично рассчитываются приведенные значения МДС F'_{m2} и сопротивление R'_{m2} нижнего магнита.

Поскольку постоянные магниты представляют собой параллелепипеды, а воздушный зазор при холостом ходе муфты образован параллельными гранями, магнитное сопротивление воздушного зазора найдем по формуле

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 l b_{ср}}, \text{ где } b_{ср} = (b_1 + b_2)/2.$$

При расчете магнитных сопротивлений R_1 и R_2 используются расчетные выражения для проводимости воздушных промежутков между прямоугольными поверхностями, лежащими в одной плоскости [6] с поправкой на угол β, соответствующий расположению магнитов по окружности.

$$R_1 = \frac{1}{\frac{\mu_0}{\beta_1} l \ln\left(1 + 2\frac{0{,}5b_1 + \sqrt{0{,}25b_1^2 + 0{,}5b_1\Delta_1}}{\Delta_1}\right)},$$

$$R_2 = \frac{1}{\frac{\mu_0}{\beta_2} l \ln\left(1 + 2\frac{0{,}5b_2 + \sqrt{0{,}25b_2^2 + 0{,}5b_2\Delta'_2}}{\Delta'_2}\right)}.$$

Если обоймы, в которых установлены постоянные магниты, выполнены из электротехнической стали, то для прикидочного расчета, точности которого в ряде случаев достаточно для оценки параметров разрабатываемой муфты, сопротивлением участков со сталью можно пренебречь по сравнению с сопротивлением воздушного зазора. Тогда можно принять $R_1 = R_2 = 0$, что существенно упростит расчеты. После того как принято решение о размерах магнитной цепи устройства, для уточнения моментных характеристик проводят поверочный расчет с учетом возможного насыщения участков со сталью.

Итак, магнитный поток $\Phi_{\delta 1}$ в воздушном зазоре равен

$$\Phi_{\delta 1} = \frac{4(F'_{m1} + F'_{m2})}{4(R_\delta + R'_{m1} + R'_{m2}) + R_1 + R_2}.$$

2. Расчет магнитного потока $\Phi_{\delta 2}$.

Для расчета магнитного потока $\Phi_{\delta 2}$ дополнительно следует найти сопротивление $R_т$. Его величина зависит от соотношения линейных размеров постоянных магнитов и величины воздушного зазора и обратна соответствующей проводимости $\lambda_т = g2b\mu_0$, где $g = f(m,n)$ – функция геометрических размеров, задаваемая графически [6]. При этом $m = (2h_m + \delta)/2h_m$, $n = b_{ср}/\delta$.

Тогда магнитный поток равен

$$\Phi_{\delta 2} = \frac{F'_{m1} + F'_{m2}}{R'_{m1} + R'_{m2} + R_\delta + R_Т}.$$

3. Корректировка сопротивлений схемы замещения.

$$R_{1к} = R_1 \frac{\Phi_{\delta 1} + \Phi_{\delta 2}}{\Phi_{\delta 1}};\ R_{2к} = R_2 \frac{\Phi_{\delta 1} + \Phi_{\delta 2}}{\Phi_{\delta 1}};$$

$$R_{Тк} = R_Т \frac{\Phi_{\delta 1} + \Phi_{\delta 2}}{\Phi_{\delta 2}}.$$

4. Расчет магнитного потока Φ_δ.

$$\Phi_\delta = \frac{4(F'_{m1} + F'_{m2})}{4(R'_{m1} + R'_{m2} + R_\delta) + (1 - k_Т)(R_{1к} + R_{2к})},$$

где $k_Т = \frac{R_1 + R_2}{R_{1к} + R_{2к} + 4R_{Тк}}$.

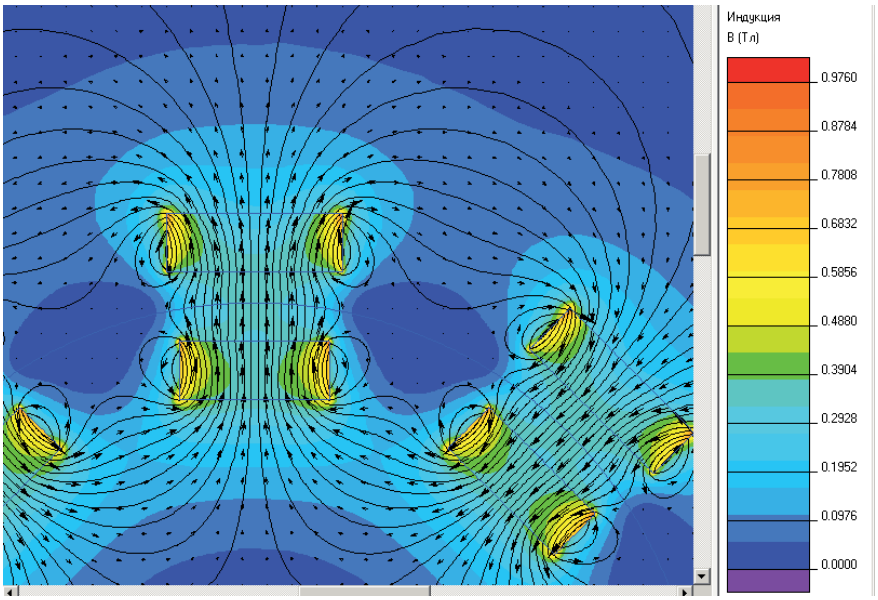


Рис. 4. Картина магнитного поля плоской задачи для угла поворота α = 0°

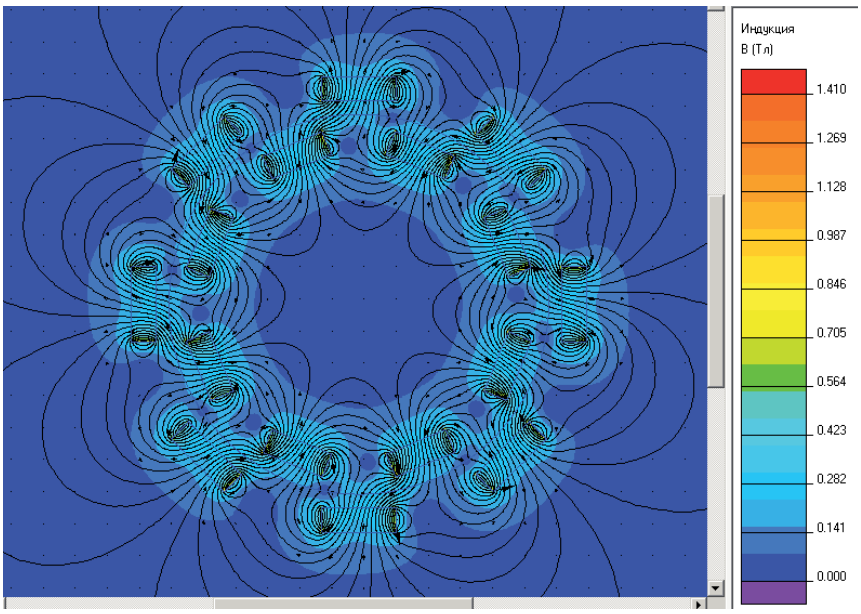


Рис. 5. Картина магнитного поля плоской задачи для угла поворота $\alpha = 180/2p$

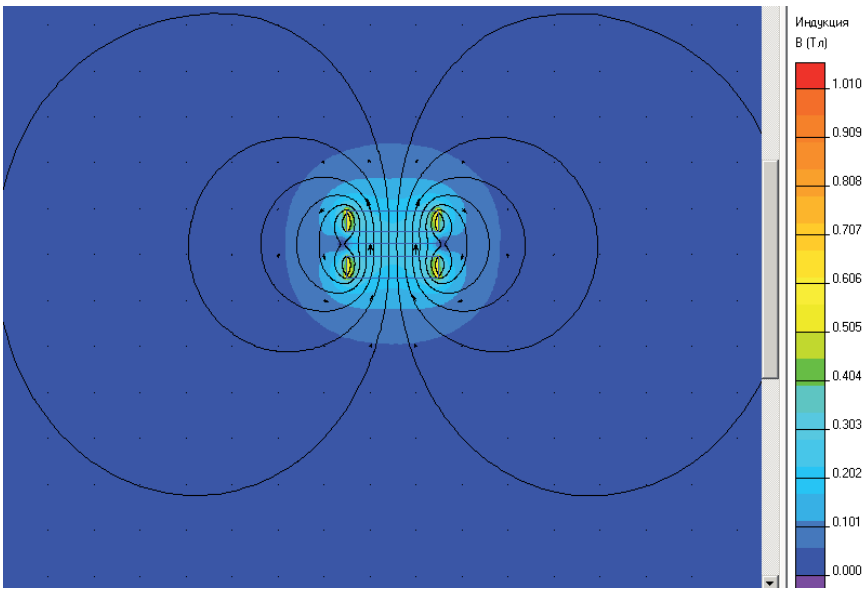


Рис. 6. Картина магнитного поля в аксиальном направлении

Изложенная методика была проверена с помощью метода конечных элементов на 2D-моделях магнитной муфты. Расхождение между рассчитанными по предложенной методике значениями момента срыва и значениями момента, полученными с помощью метода конечных элементов, для конкретных заданных размеров магнитных муфт не превышает 10%. Следует заметить, что точность расчета во многом определяется тщательностью в определении геометрии путей прохождения составляющих магнитного потока и корректным применением расчетных формул для проводимости соответствующих магнитных промежутков [6]. На рис. 4 и 5 показана картина магнитного поля для 2D-анализа при угле поворота нижней полумуфты $\alpha = 0°$ и $\alpha = 180/2p$. На рис. 6 представлена картина магнитного поля в аксиальном направлении.

Заключение

Предложенная методика дает возможность рассчитать момент срыва магнитных муфт, где арматура и конструкционные детали выполнены из немагнитных материалов ($\mu = 1$), и может быть рекомендована для поверочного расчета магнитных муфт на этапе проработки вариантов конструкции и выбора числа пар полюсов.

Библиографический список

1. [Электронный ресурс]. URL: http://www.erga.ru.

2. [Электронный ресурс]. URL: http://mash-him.ru.

3. [Электронный ресурс]. URL: http://tapflo.com.ru.

4. *Красильников А. Я.* Стандартные конструкции магнитных систем и муфт // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2002. № 7. С. 35–37.

5. *Лапшин Э. В., Толстоухов И. В.* Экспериментальные исследования магнитных муфт: тр. Междун. симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2014. Т. 2.

6. Постоянные магниты. Справочник / под ред. Ю. М. Пятина. М.: Энергия, 1971. 376 с.

7. *Косулин В. Д.* Выбор числа пар полюсов магнитной муфты: сб. докл. НТК «Завалишинские чтения'2011». СПб.: ГУАП, 2011. С. 155–159.

УДК 621.31

***И. Ю. Кручинина*[1,2]**
доктор технических наук, зам. директора по научной работе

***Ю. Ф. Хозиков*[2]**
старший научный сотрудник

***А. С. Любимцев*[2]**
научный сотрудник

***В. В. Пальцева*[2]**
младший научный сотрудник
[1] *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
[2] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук*

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИИ МАССИВНОГО РОТОРА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ЕГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

В статье представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния массивного ротора высокооборотных асинхронных двигателей с использованием метода конечных элементов. Показаны способы улучшения распределения тока по продольной оси ротора: фрезирование пазов в массиве, установка короткозамыкающих торцевых колец внутреннего и внешнего крепления, повышающие энергетические показатели двигателей. Все эти меры влияют на напряженно-деформированное состояние ротора, и каждый из вариантов должен проверяться на допустимые механические нагрузки.

Ключевые слова: *массив ротора, моделирование, асинхронный двигатель, вращающий момент, короткозамыкающие кольца, предел текучести, прочность.*

***I. Yu. Kruchinina*[1, 2]**
Dr. Sc., Tech., Depute Director

***Yu. F. Khozikov*[2]**
Senior Researcher

***A. S. Liubimtcev*[2]**
Researcher

***V. V. Paltceva*[2]**
Junior Researcher
[1] *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
[2] *Federal Agency for Scientific Organizations, Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences Federal Agency of Scientific Organizations*

EFFECTS OF INDUCTION MACHINE SOLID ROTOR DESIGN OPTIONS ON THE STRESS-STRAINED STATE

The article presents the results of the analysis of stress-strained state of the high-speed rotating solid rotor of induction motor. The analysis is based on finite element method. To improve torque-speed characteristics and force axial current distribution various design options could be realized. Such as, axial slots placed on the rotor surface, short-circuiting face rings (both inner and surface mounting). All these modifications have impact on the stress-strained state profile of the rotor and each variant should be tested against allowable stress value.

Keywords: *solid rotor, modeling, induction motor, torque, short-circuiting rings, yield stress, durability.*

Тенденции современного энергомашиностроения направлены на повышение компактности и надежности электрооборудования для децентрализованной энергетики, что особенно актуально в аэрокосмической отрасли. Стремление уменьшить геометрические размеры и одновременно увеличить единичную мощность связано с существенным повышением частоты вращения используемых агрегатов [1–3].

Исследования конструкций с различными геометрическими особенностями и варьированием электрофизических свойств материала магнитопровода позволяют уточнить математические модели электромагнитных процессов, протекающих в активных частях современных электродвигателей [3, 4]. Это дает возможность сформулировать рекомендации для выбора материалов со значениями электропроводности, магнитной проницаемости и прочностными свойствами, необходимыми для получения максимального вращающего момента и других эксплуатационных характеристик [5, 6].

Наряду со все более широко применяемыми электромеханическими преобразователями энергии с постоянными магнитами [7, 8] перспективным является и использование асинхронных машин. Асинхронные двигатели, в основном с короткозамкнутым ротором, – наиболее распространенный класс электрических машин промышленного назначения. Их конструкции выверены и оптимизированы по критерию достижения максимального коэффициента полезного действия (КПД) и ресурса работы, однако предел их эксплуатации ограничен частотой вращения. При частотах вращения более 3000 об/мин возникает проблема прочности ротора и крепления короткозамкнутых стержней на роторе.

Применение массивного ротора, обладающего большой механической прочностью, позволяет построить асинхронные двигатели на частоты вращения до 100 000 об/мин и более. Развитие материаловедения и создание новых материалов позволяет расширить перспективы применения машин с массивным ротором как наиболее технологичных, отвечающих высоким прочностным требованиям. Проблемы расширения области их применения связаны с необходимостью повышения их энергетических показателей ($\cos\varphi$, КПД). Эти вопросы решаются поиском оптимального соотношения между удельным электрическим сопротивлением и магнитной проницаемостью материала массивного ротора [7, 8].

Обоснование выбора конструктивного исполнения и свойств материалов для асинхронных высокооборотных машин с массивным ротором

Для высокоскоростных машин с целью повышения механической прочности ротора ротор изготавливают массивным. Учитывая, что режимы работы электродвигателей предполагают частые пуски и остановы, конструктивные элементы должны работать в упругой зоне механических напряжений. Для расчета напряжения, определяющего максимально нагруженные зоны в упругой области, будем пользоваться критерием максимального напряжение по Мизесу, который основывается на теории Мизес – Хенки (Mises – Hencky), также известной как теория энергии формоизменения.

Для главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3 напряжение по Мизесу выражается как [9]:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]/2\}^{1/2}.$$

Теория утверждает, что в пластичном материале начинают накапливаться микроповреждения в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев предел текучести используется в качестве предельного напряжения. Тогда критерий прочности можно записать в виде

$$\sigma_{\text{vonMises}} \leq \sigma_s / k,$$

где σ_s – предел текучести, k – коэффициент запаса.

Основными усилиями, действующими на вращающийся ротор, являются массовые центробежные силы, плотность распределения которых в материале ротора вычисляется по формуле

$$F_r(r) = \rho \cdot \omega^2 \cdot r,$$

где ρ – плотность материала; $\omega = (2 \cdot \pi \cdot f)/p$ – угловая частота вращения ротора, f – частота сети питающего напряжения, p – число пар полюсов.

В асинхронной и синхронной электрической машине традиционного исполнения магнитный поток направлен радиально, а ток в роторе направлен вдоль продольной оси. Тогда взаимодействие потока и тока порождают силу, величину и направление которой можно определить по закону Лоренца. Это взаимодействие и создает крутящий момент.

К недостаткам гладкого массивного ротора, ухудшающим его энергетические показатели, относится сложное распределение токов по всем трем координатам, причем осевая составляющая значительно превалирует только в средней части массива ротора. Наличие в массиве тока, ориентированного не только вдоль оси ротора, приводит к дополнительным паразитным потерям.

Возможными конструктивными путями улучшения распределения тока вдоль продольной оси являются:

– фрезеровка пазов в массиве, с тем чтобы увеличить сопротивление для неосевого тока [10].

– расположение короткозамыкающих колец по торцам, с тем чтобы обеспечить осевому току путь с малым сопротивлением для замыкания [3].

Для высокоскоростных машин все варианты конструкции должны быть проверены расчетами на условие удовлетворения требованию механической прочности. Так как затраты времени на механические расчеты меньше, чем на расчеты электромагнитного поля, то целесообразно начинать моделирование именно с прочностного расчета.

Обоснование требований к прочностным свойствам материалов вращающихся элементов конструкции на основе анализа их напряженно-деформированного состояния

В качестве материалов для массивного ротора могут применяться стали, железомедные сплавы с содержанием меди от 15% до 60%. Для материалов короткозамыкающих колец целесообразно рассматривать варианты: медь, бронза, латунь. В таблице приведены электрофизические свойства этих материалов.

Для короткозамыкающих колец предпочтительно использовать материалы с высокой удельной электропроводностью, так как основная задача колец – обеспечить протекание и замыкание электрического тока по торцам.

Для расчета механических напряжений в роторе численными методами можно использовать современные пакеты прикладных программ. Входными параметрами являются: геометрия машины, физические свойства материалов, усилия. Выходной параметр – картина распределения механических напряжений и величина максимального напряжения.

Если пренебречь изгибом вала ротора под собственным весом и электромагнитными усилиями, то задачу можно решить в 2D-постановке.

Пример расчета механических напряжений для массивного ротора 2-полюсной машины (800 Гц), выполненный в 2-мерном пакете моделирования [12] (осесимметричная задача), представлен на рис. 1.

Прочностной расчет в соответствии с рис. 1 показывает, что в центральной части массивного ротора напряжения составляют 286 МПа и превышают предел текучести для железомедного сплава СМ-20 (121 МПа, см. табл.).

Таблица 1

Физические свойства материалов, применяемых для изготовления ротора и колец

	Плотность, кг/м^3	Модуль Юнга, ГПА	Предел текучести, МПа	Электропроводность, См/м
Медь	8900	130	33340	58e6
Сталь3	7850	200	143–170	7,69e6
СМ-20	8060	190	190	7,7e6
Бронза	8700–9100	100–130	200–500	(5–15)e6
Латунь	8400	105–115	100–500	15e6

*СМ20 – железомедный сплав с 20%-ным содержанием меди [11].

Согласно ГОСТу [13], машина должна выдерживать набор скорости до 120% от номинальной в течение 2 минут. Для обеспечения прочности ротора с необходимым запасом требуется материал с пределом текучести свыше 300 МПА. К примеру, сталь 45 имеет предел текучести 230 МПа, а высокопрочная сталь А514 – 690 МПа. Для материала ротора не рекомендуется выбирать немагнитные стали.

Для уменьшения механических напряжений можно уменьшить массу ротора. Для этой цели можно фрезеровать осевые каналы как на поверхности ротора, так и в его массиве. На рис. 2, *а* показано распределение механических напряжений в массивном роторе с фрезерованными пазами. Видно, что размер центральной зоны, в которой наблюдались высокие напряжения, уменьшился (одновременно эта мера позволяет увеличить вращающий момент).

Наличие внутренних осевых каналов, с одной стороны, облегчает конструкцию, но, с другой стороны, привносит концентраторы механических напряжений и уменьшает эффективное сечение для прохождения магнитного потока. Расчет такой конструкции показан на рис. 2, *б*. Видно, что центральная зона с высокими механическими напряжениями уменьшилась, но возросли локальные напряжения вокруг каналов. Такое перераспределение напряжений является

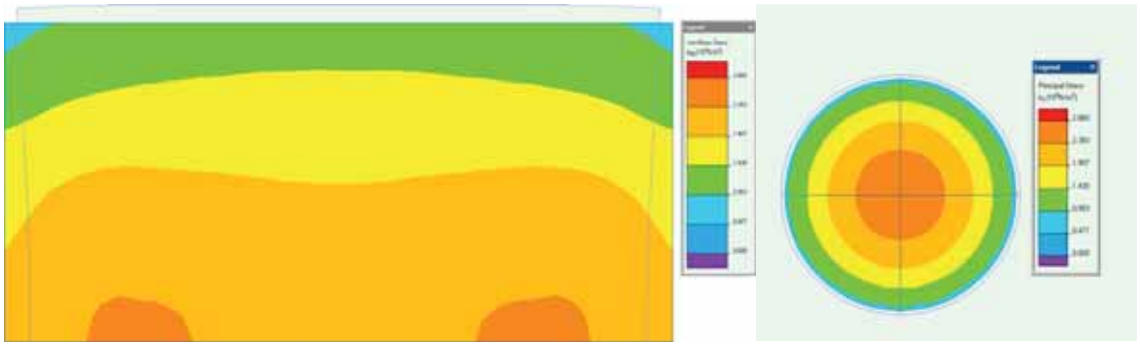


Рис. 1. Прочностной расчет ротора 2-полюсной машины (800 Гц)

а) б)

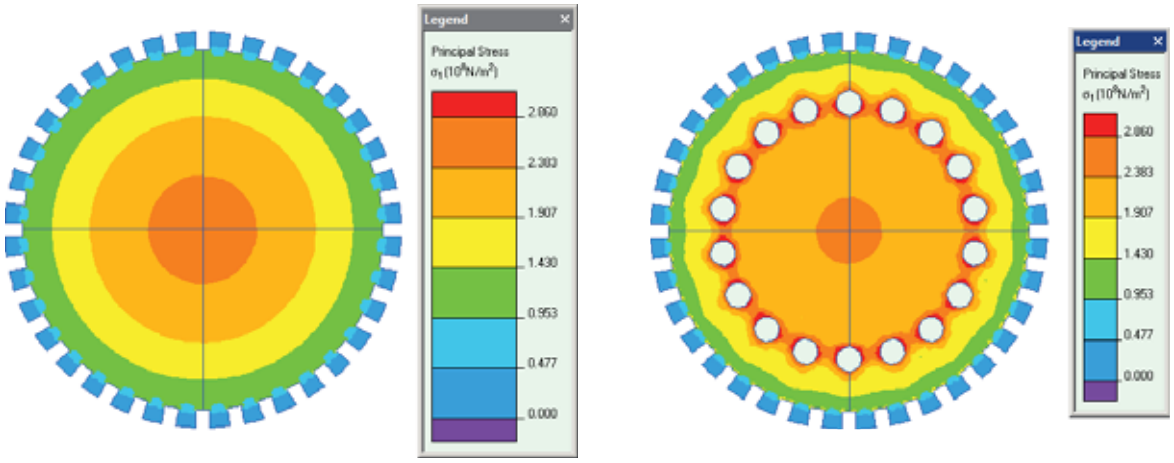


Рис. 2. Прочностной расчет конструкции ротора с пазами (36 пазов 4×5 мм) (а) и аксиальными каналами (б)

допустимым, если концентрация напряжений вокруг отверстий не выше, чем в центральной зоне ротора.

Следует выбирать диаметр каналов таким образом, чтобы максимальные напряжения были не выше, чем в центре ротора или на поверхности центрального отверстия (если оно предусмотрено).

Для увеличения выходного момента двигателя предлагается использование короткозамыкающих колец из меди, бронзы или латуни. Существуют разные способы для крепления замыкающих колец: закрепление с натягом, внутренняя установка, пайка.

Расчеты показывают, что торцевая пайка сильно увеличивает локальные механические напряжения в месте контакта (рис. 3).

Установку колец с натягом необходимо проводить с расчетным усилием натяга для исключения отрыва кольца. На рис. 4, *а*, *б* показаны результаты раздельного моделирования кольца и ротора с целью определения необходимой температуры разогрева перед натягом. Установлено, что температура посадки 285 °С обеспечивает минимально требуемую величину натяга.

С целью определения надежности закрепления медных короткозамыкающих колец осуществлен уточненный расчет. Решение 3D-контактной задачи выявило наличие проблемы с осевым примыканием кольца. При высокой скорости вращения стенка кольца отходит от стенки ротора и тем самым нарушается электрический контакт. Механические силы вызывают выворачивание кольца, и посадка будет нарушена.

Для решения этих проблем предложено изготавливать внутреннее короткозамыкающее кольцо или фрезеровать кольцевой паз специальной формы в торцевой зоне ротора.

Для определения необходимого натяга горячей посадки решается трехмерная задача опре-

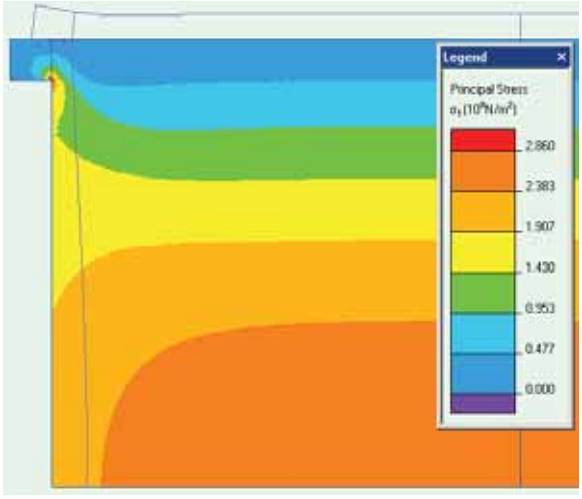


Рис. 3. Прочностной расчет при креплении торцевого кольца пайкой

деления механических напряжений и перемещений свободных кольца и ротора. Разница величин радиальных перемещений внутренней поверхности кольца и посадочной поверхности ротора определяет величину натяга.

Для модельного генератора с расчетной частотой вращения 30 000 об/мин результаты решения задачи представлены на рис. 5, *а*, *б*. На рис. 5, *а* показаны распределения величины радиального перемещения кольца и ротора; а на рис. 5, *б* – распределения эквивалентных напряжений по Мизесу.

Видно, что напряжения в короткозамыкающем кольце при заданной частоте вращения превышают напряжения на поверхности центрального отверстия и выше предела текучести наиболее часто применяемых сортов меди. Поскольку величина натяга должна быть выбрана несколько больше, чем разница в радиальных перемещениях (для обеспечения необходимого запаса), напряжения в кольце еще возрастут.

В качестве иллюстрации перейдем к рассмотрению варианта впаянного короткозамыкающего кольца. Для этого решена задача о совместной деформации ротора и кольца при заданной частоте вращения. Результаты расчетов приведены на рис. 6 *а*, *б*, *в*.

На рис. 6, *а* представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу системы связанных кольца и ротора. На рис. 6, *б* показаны распределения радиальных напряжений на внутренней поверхности кольца и торцевой поверхности, соединенных с ротором. Величины этих напряжений определяют необходимые передаточные усилия, воспринимаемые пайкой, для совместной работы кольца и ротора. На поверхности внутреннего отверстия – усилие отрыва; на торцевой поверхности – усилие сдвига.

а) б)

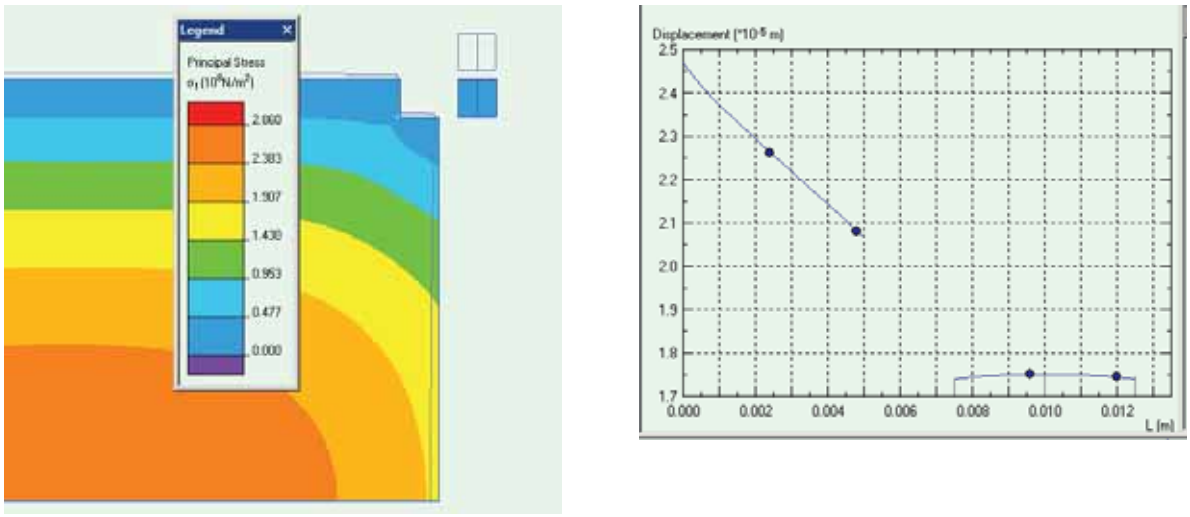


Рис. 4. Прочностной расчет замыкающего кольца и ротора при раздельном моделировании. График зависимости радиального смещения посадочного места (а) и медного кольца (б) при скорости вращения 48 000 об/мин

а) б)

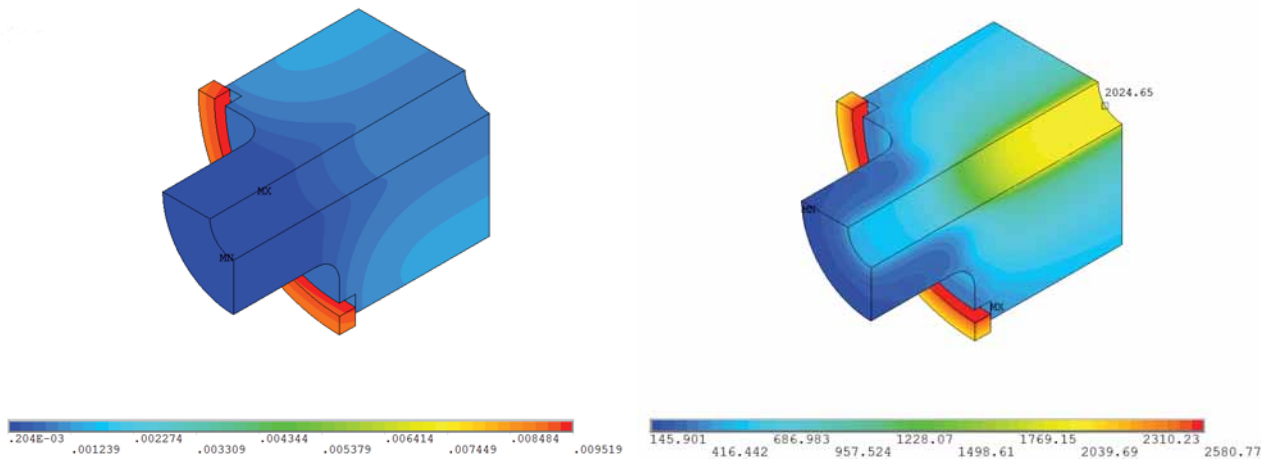


Рис. 5. Распределения величины радиального перемещения кольца и ротора (а) и эквивалентных напряжений по Мизесу (б)

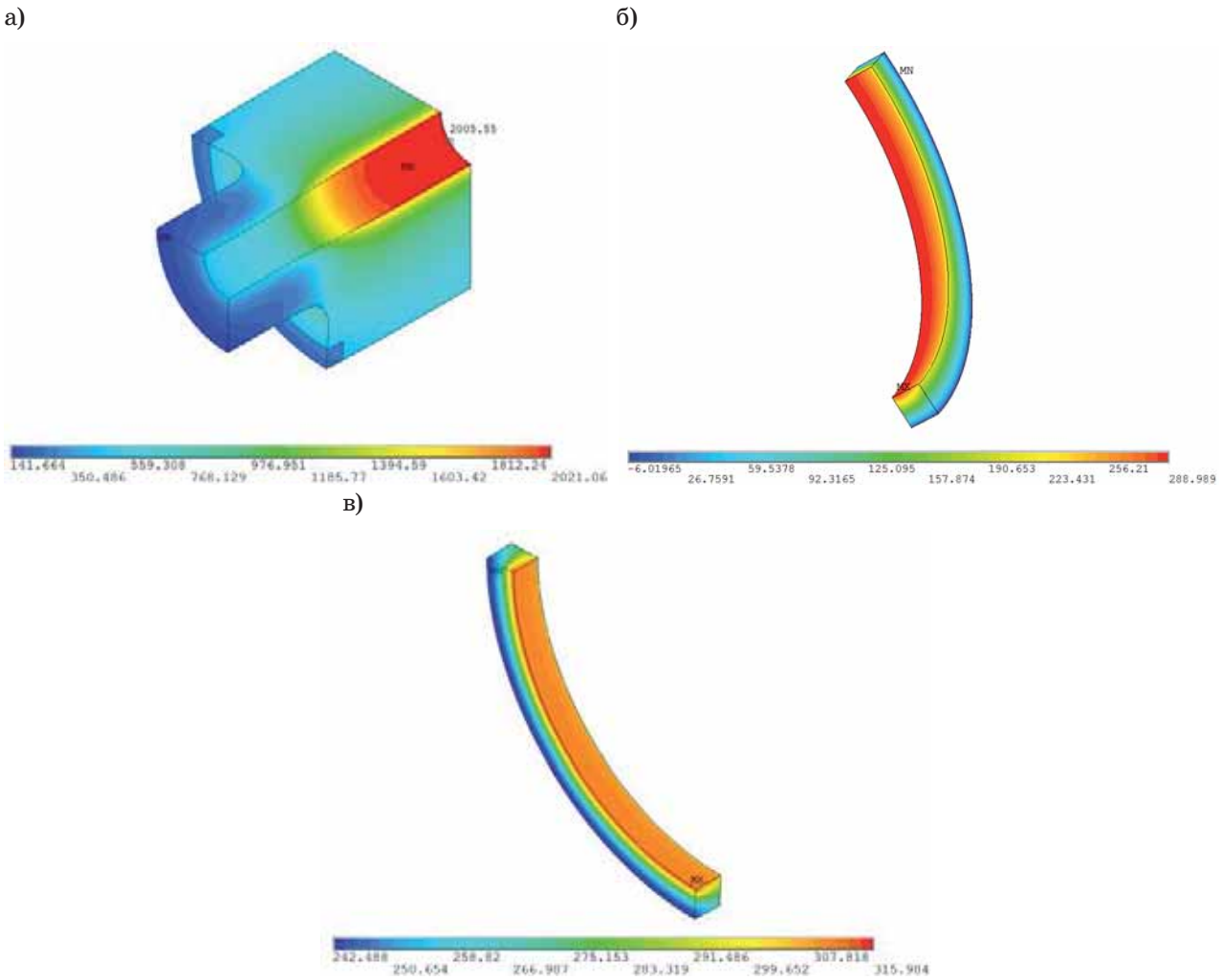


Рис. 6. Распределение напряжений: а) эквивалентных по Мизесу системы связанных кольца и ротора; б) радиальных на внутренней поверхности кольца и торцевой поверхности, соединенных с ротором; в) эквивалентных по Мизесу в короткозамыкающем кольце

На рис. 6, *в* показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в короткозамыкающем кольце. Видно, что, в отличие от напряжений на рис. 5, эти напряжения в несколько раз ниже.

Разрушающие напряжения серебряно-медных припоев для пайки имеют порядок 2500–3000 кГ/см^2, что значительно выше, чем напряжения, показанные на рис. 6, *б*.

Заключение

Исследование надежности закрепления медных короткозамыкающих колец уточненным расчетом 3D-контактной задачи выявило наличие проблемы с осевым примыканием кольца. На основе решения задачи о совместной деформации ротора и короткозамыкающего торцевого кольца при заданной частоте вращения рекомендован вариант внутренней установки торцевого кольца (впаянного короткозамыкающего кольца, имеющего преимущество по надежности обеспечения контакта по сравнению с креплением кольца с натягом). Для высокооборотных машин предпочтительным вариантом крепления короткозамыкающего кольца является впайка кольца в массив ротора по контактным поверхностям (торцевой и цилиндрической), что позволяет значительно снизить собственное напряженное состояние медного кольца и обеспечить требуемый электрический контакт. Современные технологии пайки позволяют обеспечить достаточную для этого прочность соединения.

Фрезерованные в массиве ротора пазы не ухудшают механическую прочность ротора, поскольку максимальные механические напряжения, определяющие прочность ротора, реализуются на внутренней поверхности ротора и быстро убывают к периферии.

Библиографический список

1. *Bumby J. R.*, Spooner E., Jageila M. A Solid Rotor Induction Motors for Turbo Assist

Operation // Book of Abstracts of XVII Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM). Chania, Greece, 2006. 140 p.

2. *Pyrhonen J.* High-Speed, 8 MW, Solid-Rotor Induction Motor for Gas Compression / J. Pyrhonen, J. Nerg, P. Kurronen, U. Laube // Proc. Of the XVIIIth International Conference on Electrical Machines. Vilamoura, Portugal, 2008.

3. *Шаров В. С.* Сверхвысокоскоростные асинхронные электродвигатели. М.-Л.: Госэнергоатомиздат, 1963. 288 с.

4. *Kalokiris G., Kladas A., Tegopolous J. A.* Advanced Materials for High Speed Motor Drivers // Book of Digests of 16 International Conference on Electrical Machines. Krakow, Poland, 2004. P. 935–936.

5. *Кручинина И. Ю.* О выборе конструкций и материалов асинхронного двигателя // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2011. № 4. С. 51–57.

6. *Кручинина И. Ю.* Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя с учетом распределения поля токов в массивном роторе // Изв. РАН. Энергетика. 2011. № 6. С. 90–97.

7. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor. Generation for Flywheel Application / A. Nagorny, N. V. Dravid, R. H. Jansen, B. H. Kenny // International Electric Machines and Drives Conference. USA, Texas, San Antonio, 2005. NASA/TM = 2005–213651.

8. Design Considerations of High-Speed Permanent Magnet Machines for Decentralized Electro Engineering. Evaluating approach / I. Kruchinina, V. Antipov, A. Ivanova etc. // Proc. Of the International IEEE Conference devoted to the 150 anniversary of Alexander S. Popov. St. Petersburg, Russia, 2009. P. 156–161.

9. *Партон В. З.* Механика разрушения: от теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.

10. *Шенфер К. И.* Асинхронные машины. М.: Госэнергоиздат, 1929. 457 с.

11. *Могильников В. С., Олейников А. М.* Теория, технология и режимы работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором: 2-е изд., перераб. и дополн., 2007. 352 с.

12. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3. Руководство пользователя, 2017. Санкт-Петербург. 296 с.

13. ГОСТ Р 52776–2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. М.: Стандартинформ, 2008.

УДК 621.314

А. А. Мартынов[1]
кандидат технических наук, доцент

О. Б. Чернышева[2]
старший преподаватель
[1,2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМ КРИВЫХ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Представлены расчетные соотношения для оценки искажения форм кривых сетевого напряжения и тока активного выпрямителя.

Ключевые слова: *активный выпрямитель, коэффициент искажения, напряжение, ток, коэффициент модуляции.*

A. A. Martynov[1]
PhD, Tech., Associate Professor

O. B. Chernysheva[2]
Senior Lecturer
[1,2]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

TO THE CALCULATION OF THE COEFFICIENTS OF THE DISTORTION OF FORMS OF NETWORK VOLTAGE AND CURRENT CURVES ACTIVE RECTIFIER

Presents the calculated ratios for evaluating distortion curves form a network voltage and current active rectifier.

Keywords: *active rectifier, distortion factor, voltage, current, modulation factor.*

Полупроводниковые выпрямители находят широкое применение во многих современных системах и устройствах преобразования электрической энергии. До недавнего времени процесс выпрямления осуществлялся с помощью не полностью управляемых вентилей – тиристоров [1]. В настоящее время управляемые выпрямители чаще выполняются на полностью управляемых вентилях – транзисторах или запираемых тиристорах. Такие выпрямители получили название активные выпрямители. Проведем сравнительный анализ энергетических показателей выпрямителей, выполненных на тиристорах и на полностью управляемых вентилях.

Величина выходного напряжения тиристорного выпрямителя $U_{d\alpha}$ пропорциональна косинусу угла регулирования α:

$$U_{d\alpha} = k_{\text{сх}} U_{2\text{ф}} \cos\alpha = U_{d0} \cos\alpha, \qquad (1)$$

где $k_{\text{сх}}$ – коэффициент преобразования схемы выпрямления;

$U_{2\text{ф}}$ – действующее значение сетевого напряжения переменного тока, подаваемого на вход выпрямителя;

$U_{d0} = k_{\text{сх}} U_{2\text{ф}}$ – среднее значение выпрямленного напряжения при $\alpha = 0$.

Энергетические показатели работы выпрямителей оцениваются двумя параметрами: коэффициентом полезного действия η и коэффициентом мощности χ.

В общем случае коэффициент мощности выпрямителя определяется отношением активной мощности, потребляемой выпрямителем из питающей сети по первой (основной) гармонике $P_{1(1)}$ к полной мощности S_1, потребляемой выпрямителем из питающей сети [1]:

$$\chi = \frac{P_{1(1)}}{S_1} = \frac{m_1 U_1 I_{1(1)} \cos\varphi_{(1)}}{m_1 U_1 I_1} = \\ = \frac{I_{1(1)}}{I_1} \cos\varphi_{(1)} = k_{\text{иск}} k_{\text{сдв}}, \qquad (2)$$

где $k_{\text{иск}} = I_{1(1)} / I_1$ – коэффициент искажения формы фазного тока сети переменного тока, питающей выпрямитель;

I_1 – действующее значение тока фазы сети, питающей выпрямитель (с учетом всех гармоник);

$I_{1(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока фазы сети, питающей выпрямитель;

$k_{\text{сдв}} = \cos\varphi_{(1)}$ – коэффициент сдвига первой гармоники тока питающей сети по отношению к напряжению;

$$\varphi_1 = \alpha + \gamma / 2;$$

γ – угол коммутации.

В общем виде для любой схемы управляемого выпрямления угол коммутации γ можно определить по формуле (3):

$$\gamma = \arccos\left[\cos\alpha - \frac{x_{\text{ф}}}{\sqrt{2}U_{2\text{л}}\sin\pi / k_{\text{Т}}m_2} I_d\right] - \alpha, \quad (3)$$

где $x_{\text{ф}}$ – индуктивное сопротивление фазы сети переменного тока;

$U_{2\text{л}}$ – действующее значение линейного напряжения сети переменного тока;

I_d – среднее значение тока на выходе выпрямителя;

$k_{\text{Т}}$ – коэффициент тактности выпрямителя: для мостовых схем $k_{\text{Т}} = 2$, а для нулевых схем $k_{\text{Т}} = 1$,

m_2 – число фаз сети переменного тока.

Коммутация влияет на гармонический состав тока, потребляемого выпрямителем из питающей сети. Для мостовых схем выпрямления при угле коммутации $\gamma = 30^\circ$ кривая тока, потребляемого выпрямителем из питающей сети, симметрична относительно оси времени и имеет форму трапеции на интервале каждого из полупериодов. Гармонический состав тока, потребляемого выпрямителем из питающей сети, в этом случае можно определить по формуле

$$i_{1(k)} = \frac{6\sqrt{3}}{\pi^2 k_{\text{тр}}} I_d \left(\sin\omega t - \frac{1}{5^2}\sin 5\omega t + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{7^2}\sin 7\omega t - \frac{1}{11^2}\sin 11\omega t + \ldots\right). \quad (4)$$

В [1] показано, что при постоянном напряжении питающей сети уменьшение выходного напряжения выпрямителя возможно только при пропорциональном уменьшении коэффициента мощности, равного произведению коэффициентов искажения и сдвига.

Нетрудно показать, что коэффициент мощности тиристорного выпрямителя определяется главным образом коэффициентом сдвига.

Приняв допущение $k_{\text{иск}} = 1$ и $\gamma = 0$, можно установить зависимость коэффициента мощности выпрямителя и коэффициента сдвига от степени регулирования выходного напряжения выпрямителя $C_p = U_{d\alpha} / U_{d0}$:

$$\chi = \cos\alpha = U_{d\alpha} / U_{d0} = C_p.$$

Таким образом, при регулировании выходного напряжения тиристорного выпрямителя в пределах от 0 до U_{d0} ($0 < C_p < 1$) коэффициент мощности выпрямителя изменяется в тех же пределах, что и C_p : $0 < \chi < 1$.

График зависимости коэффициента мощности тиристорного выпрямителя от степени регулирования выходного напряжения выпрямителя приведен на рис. 1, характеристика 1.

Линейная зависимость коэффициента мощности выпрямителя от степени регулирования является существенным недостатком тиристорных выпрямителей, который существенно ограничивает их область применения.

Независимость коэффициента мощности выпрямителя от степени регулирования выходного напряжения может быть реализована в активных выпрямителях (АВ), выполненных на полностью управляемых вентилях.

Использование АВ вместо диодных и тиристорных выпрямителей позволяет:

– улучшить энергетические показатели выпрямителя;

– сделать форму входных токов выпрямителя практически синусоидальной;

– регулировать фазы входных токов с целью регулирования величины потребляемой реактивной мощности.

Рассмотрим некоторые аспекты работы АВ, выполненного по трехфазной мостовой схеме, приведенной на рис. 2.

Кроме вышеперечисленных достоинств АВ, следует отметить также и его способность работать как в режимах выпрямления, инвертирования, так и компенсатора реактивной мощности сети.

Величина коэффициента мощности АВ определяется главным образом коэффициентом искажения формы тока, потребляемого выпрямителем из питающей сети, поскольку коэффициент сдвига у АВ, как правило, поддерживается равным или близким к 1.

Для поддержания заданного значения коэффициента сдвига необходимо с помощью регуля-

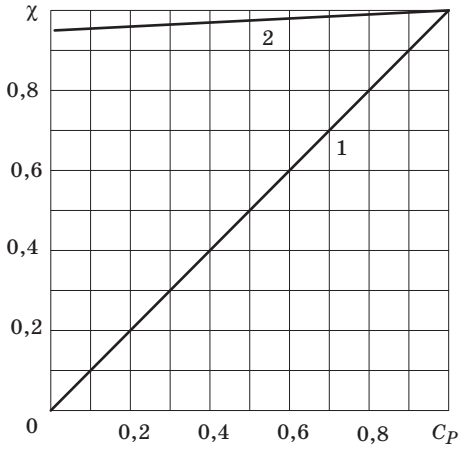


Рис. 1. Зависимость коэффициента мощности от степени регулирования выходного напряжения тиристорного выпрямителя

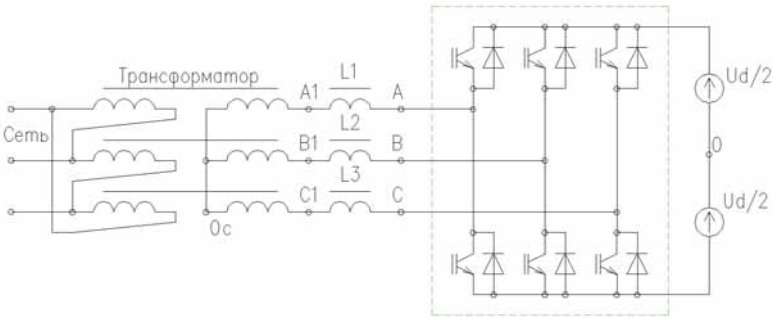


Рис. 2. Функциональная схема АВ с сетевыми реакторами $L_{1\,(2,\,3)}$ при питании от сети переменного тока через трансформатор

тора системы управления АВ изменять фазовый сдвиг первых гармоник фазных напряжений сети $U_{c(1)}$ и напряжения $U_{\text{вх}(1)}$ непосредственно на входе АВ.

Указанное регулирование осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При таком методе регулирования с помощью транзисторов силовой схемы АВ фазное напряжение сети $U_{c(1)}$ за период основной частоты многократно замыкается на дроссели L. Энергия, накопленная в дросселе на интервале открытого состояния транзистора, после его закрывания передается в цепь постоянного тока АВ.

Импульсы управления транзисторами силовой схемы АВ формируются в результате сравнения опорных напряжений $u_{\text{оп}}$ пилообразной формы частоты $f_{\text{н}}$ с напряжениями управления u_{yA}, u_{yB} и u_{yC} (рис. 3). Отношение амплитуды напряжения управления к амплитуде опорного напряжения принято называть коэффициентом модуляции μ, т. е.:

$$\mu = u_{ym} / u_{\text{оп}\,m}.$$

Если принять амплитуду опорного напряжения равной 1, то напряжения управления фаз А, В и С будут иметь вид

$$u_{yA} = \mu \sin \omega t,$$

$$u_{yB} = \mu \sin(\omega t - 2\pi / 3),$$

$$u_{yC} = \mu \sin(\omega t + 2\pi / 3), \qquad (5)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота модулирующего сигнала, равная угловой частоте сети переменного тока.

Отметим, что мгновенное значение напряжения управления фазы определяет величину коэффициента скважности γ импульса фазного напряжения в рассматриваемый момент времени, т. е. $\gamma \equiv u_y$, и, следовательно, определяет величину напряжения фазы.

В связи с периодическими замыканиями источника U_c на дроссели с некоторой «несущей частотой» (частотой $f_{\text{н}}$) во входных токах АВ, помимо основной волны, имеются составляющие с частотой $f_{\text{н}}$. В состав высших гармонических сетевого тока АВ входят группы комбинационных гармоник, расположенные вблизи несущей частоты $f_{\text{н}}$ и кратных ей гармоник: 2 $f_{\text{н}}$, 3 $f_{\text{н}}$ и 4$f_{\text{н}}$. Порядок (номер) высших гармонических при синусоидальной ШИМ определяется по формуле (6):

$$\nu_{1,2} = f_{\text{н}} / f_{\text{м}} \pm 1;\ \nu_{3,4} = 2f_{\text{н}} / f_{\text{м}} \pm 1;$$
$$\nu_{5,6} = 3f_{\text{н}} / f_{\text{м}} \pm 1;\ \nu_{7,8} = 4f_{\text{н}} / f_{\text{м}} \pm 1. \qquad (6)$$

Степень искажения формы кривой напряжения (тока) принято оценивать коэффициентом гармоник $k_{\text{т}}$.

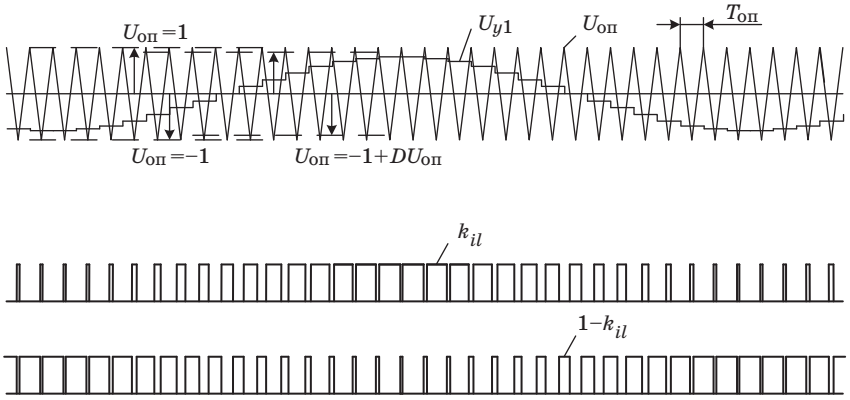


Рис. 3. Опорное напряжение, напряжение управления и функции состояния транзисторов одного плеча активного выпрямителя в режиме синусоидальной ШИМ

Коэффициент гармоник напряжения (или коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения) определяется как отношение действующего значения напряжения всех высших гармоник к действующему значению напряжения первой гармоники:

$$k_{\text{т.н}} = \sqrt{\sum_{2}^{\infty} U_{\nu}^2} / U_1 , \qquad (7)$$

где ν – порядок (номер) высшей гармоники;

U_{ν} – действующее значение υ-й гармоники напряжения.

В том случае, когда известны действующее значение первой гармоники линейного напряжения $U_{\text{вх л}(1)}$ и действующее значение линейного напряжения с учетом всех гармоник $U_{\text{вх л}}$, коэффициент гармоник входного напряжения АВ, $k_{\text{т.н1}}$ можно определить по формуле (8):

$$k_{\text{т.н1}} = \frac{\sqrt{U_{\text{вх. л}}^2 - U_{\text{вх. л}(1)}^2}}{U_{\text{вх.л}(1)}} = \frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{вх. л}(1)}}. \qquad (8)$$

Числитель формулы (8) равен действующему значению так называемого напряжения искажения $U_{\text{и}}$. Таким образом, коэффициент гармоник можно характеризовать как относительную величину действующего значения напряжения искажения. При синусоидальной форме напряжения $k_{\text{т.н1}} = 0$.

Для оценки влияния параметров АВ на гармонический состав сетевого напряжения и тока воспользуемся компьютерной моделью АВ, созданной в пакете MATLAB Simulink. Схема компьютерной модели АВ приведена на рис. 4.

В модели приняты следующие параметры сетевых реакторов: $L = 1{,}46$ мГн, $R = 40$ мОм.

Результаты исследования установившихся режимов работы активного выпрямителя приведены на рис. 5–8.

На рис. 5 приведены временная диаграмма линейного напряжения U_{AB} и спектрограмма этого напряжения при коэффициенте модуляции $\mu = 0{,}5$ и несущей частоте $f_{\text{н}} = 5000$ Гц, $U_{dc} = 1073$ В; $k_{\text{т.н1}} = 128{,}7\%$.

Напряжение U_{AB} – это линейное напряжение в точках подключения сетевых реакторов $L_{1,(2,3)}$ к зажимам АВ схемы активного выпрямителя (рис. 2). Коэффициент гармоник этого напряжения при установленном режиме работы активного выпрямителя составляет 128,7%.

Для поддержания коэффициента мощности активного выпрямителя, близкого к 1, необходимо принимать меры к подавлению высших гармонических тока, потребляемого выпрямителем из сети переменного тока, и приближать форму кривой этого тока к синусоидальной. Функцию фильтра высших гармонических тока сети переменного тока выполняют так называемые сетевые фильтры, устанавливаемые в цепи переменного тока АВ.

При этом эффективность работы фильтра зависит от величины несущей частоты, с которой переключаются транзисторы. В 70-х годах прошлого века О. А. Маевский доказал эффективность преобразования электрической энергии с использованием высокой несущей частоты по сравнению с преобразованием энергии на сетевой частоте. Он утверждал, что «при частотном преобразовании реактивной мощности нелинейными активными сопротивлениями коэффициентом пропорциональности при превращении реактивной мощности одной частоты в реактивную мощность другой является отношение их частот» [1]. Другими словами, реактивная мощность высокой частоты, преобразуемая в реактивную мощность более низкой частоты, увеличивается в число раз, равное отношению несущей частоты к сетевой частоте, и подавление высших гармоник, содержащихся в кривой потребляемого активным выпрямителем тока, осуществляется при меньшем значении индуктивности сетевого реактора. На практике часто величину индуктивности дросселя сетевого фильтра определяют по приближенной формуле (9):

$$L = \frac{U_{dc}}{6\pi f_{\text{н}} \Delta I_{\text{ф}}} , \qquad (9)$$

где U_{dc} – напряжение цепи постоянного тока АВ;

$\Delta I_{\text{ф}} = k_{\text{т.т}} I_{\text{ф.н}} \sqrt{2}$ – амплитуда пульсации сетевого тока АВ;

$k_{\text{т.т}}$ – коэффициент гармоник сетевого тока АВ;

$f_{\text{н}}$ – несущая частота ШИМ.

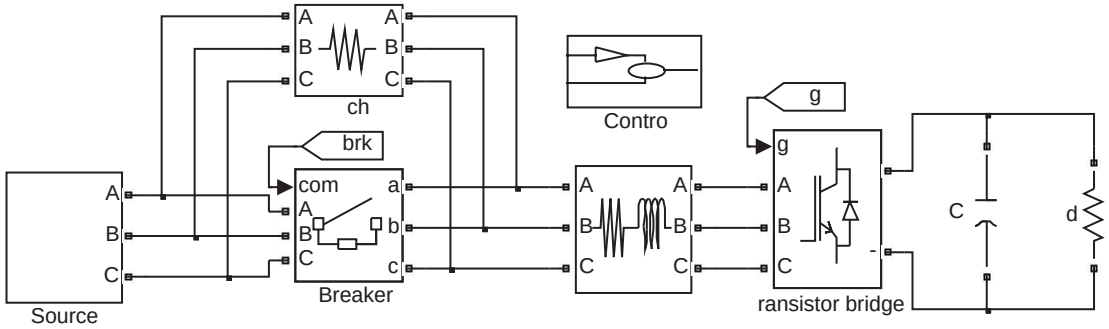


Рис. 4. Компьютерная модель активного выпрямителя

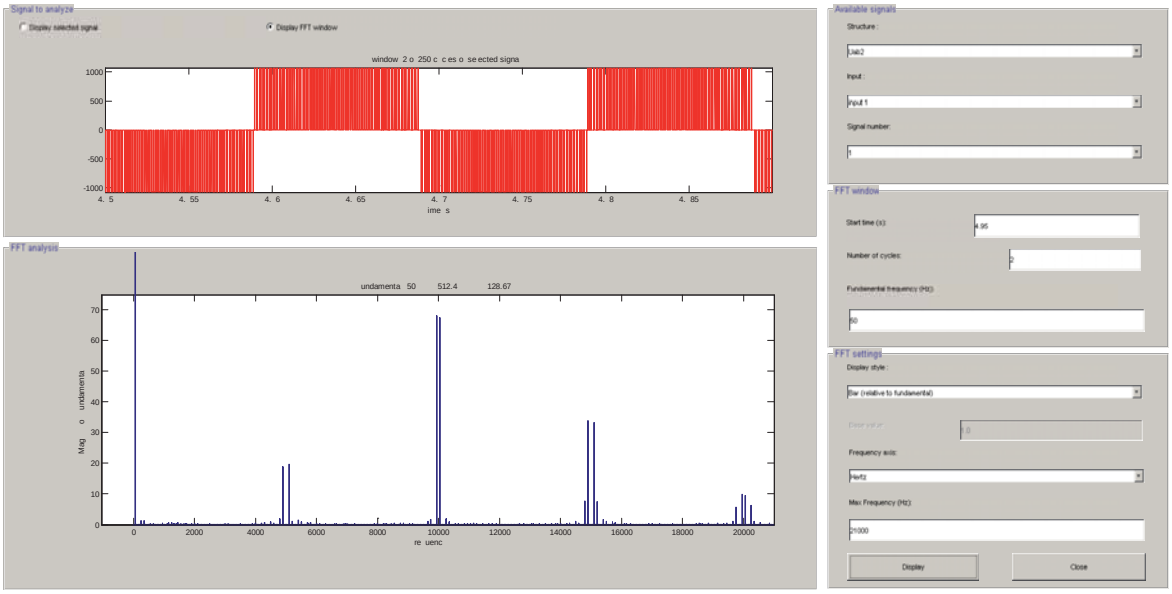


Рис. 5. Временная диаграмма линейного напряжения активного выпрямителя U_{AB} и спектрограмма этого напряжения

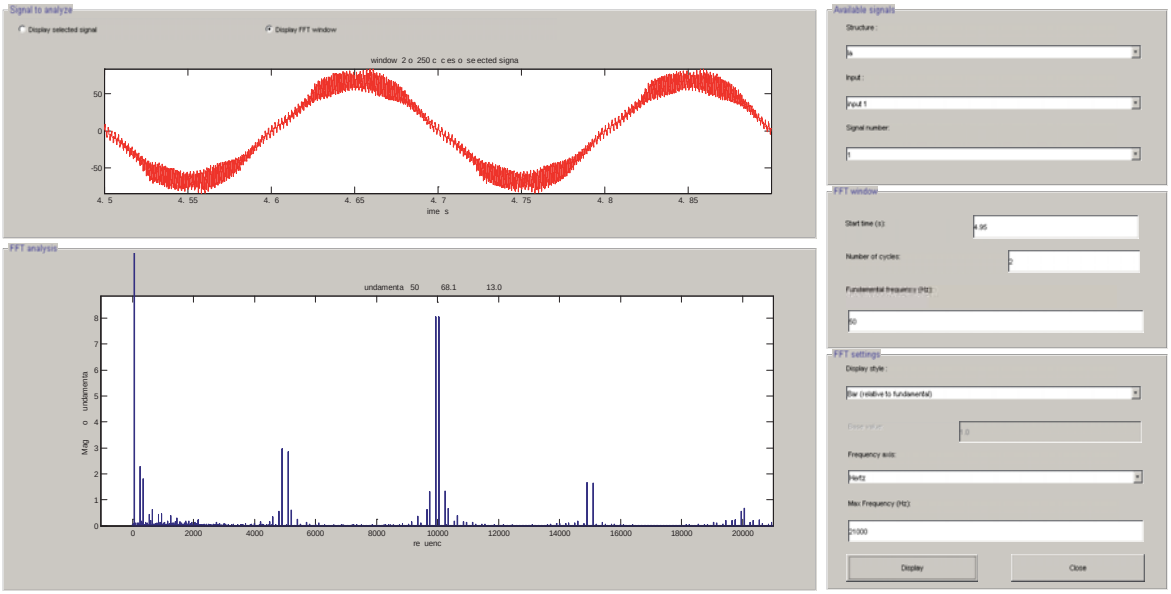


Рис. 6. Временная диаграмма тока фазы сети и спектрограмма этого тока

При повышенных требованиях к величине коэффициента гармоник сетевого тока и напряжения сети переменного тока в дополнение к индуктивному сетевому фильтру приходится устанавливать и емкостной фильтр [3]. Параметры сетевого L–C фильтра можно определить, воспользовавшись уравнениями (10) и (11):

$$\omega^2 LC = \frac{\left(1 + k_{\text{т.н2}} k_\nu\right) / \nu^2}{\left(1 + k_{\text{т.н2}} k_\nu\right)}, \qquad (10)$$

$$L / C = R^2_{\text{нг. э}} \left(1 + \omega^2 LC\right), \qquad (11)$$

где $k_{\text{т.н2}}$ – требуемое значение коэффициента гармоник сетевого напряжения, т. е. в точках подключения фильтра к питающей сети;

k_ν – коэффициент режекции, учитываемой высшей гармонической;

$R_{\text{нг. э}} = P_\text{ф} / I^2_\text{ф}$ – эквиваленое значение активного сопротивления нагрузки фазы;

ν – порядковый номер высшей гармонической, имеющей наименьший коэффициента режекции.

Уравнение (11) определяет отношение L/C сетевого фильтра из условия обеспечения минимума суммарной относительной мощности фильтра.

Коэффициент режекции гармоники напряжения ν-го порядка, k_ν, определяется по формуле (12):

$$k_\nu = \left(U_{(1)} / U_{(\nu)}\right) \cdot \nu^2, \qquad (12)$$

где $U_{(1)}$ – действующее значение первой гармоники входного напряжения АВ; $U_{(\nu)}$ – действу-

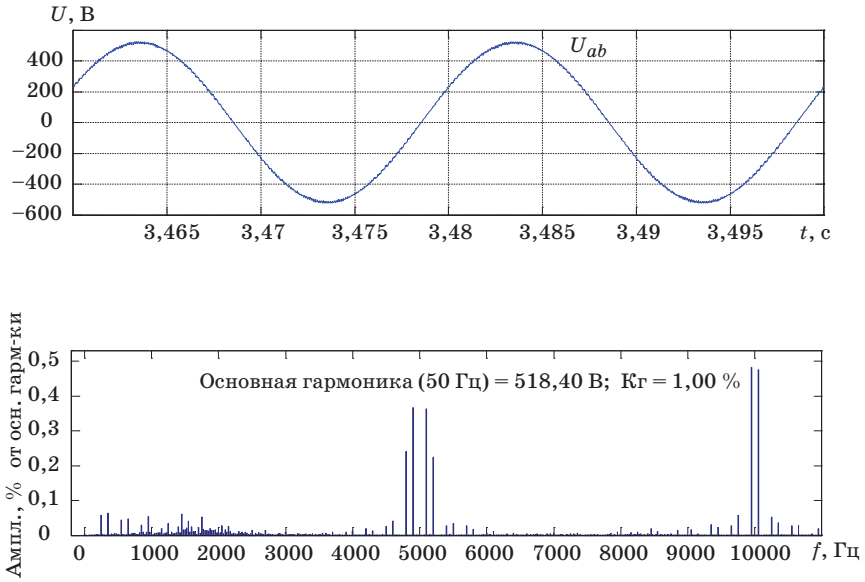


Рис. 7. Временная диаграмма линейного напряжения U_{A1B1} *и спектрограмма этого напряжения при* $P_{dc} = 30{,}67$ кВт, $k_{\text{т.н2}} = 1\%$

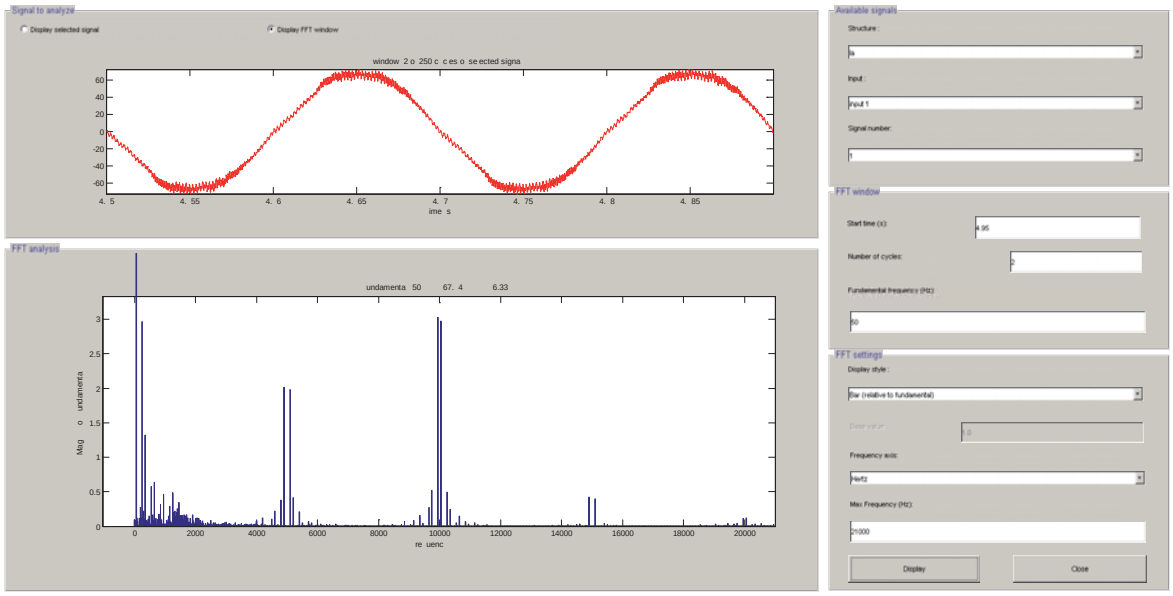


Рис. 8. Временная диаграмма фазного тока АВ и спектрограмма этого тока при коэффициенте модуляции $\mu = 0{,}5$ *и несущей частоте* $f_{\text{н}} = 5000$ Гц; $U_{dc} = 1085$ В; $k_{\text{т.т}} = 0{,}063\left(C_{\text{ф}} = 20\ \text{мкФ}\right)$

ющее значение ν-ой гармоники входного напряжения АВ.

Параметр сетевого фильтра $\omega^2 LC$ по существу характеризует величину установленной мощности фильтра.

На рис. 6 приведены временная диаграмма тока фазы сети и спектрограмма этого тока при коэффициенте модуляции $\mu = 0{,}5$ и несущей частоте $f_{\text{н}} = 5000$ Гц, $U_{dc} = 1073$ В. Коэффициент гармоник сетевого тока составляет при заданном режиме работы АВ $k_{\text{т.т}} = 13{,}08\%$.

На рис. 7 приведена временная диаграмма линейного напряжения U_{A1B1} и спектрограмма этого напряжения. Линейное напряжение U_{A1B1} – это напряжение в точках подключения сетевых реакторов $L_{1,(2,3)}$ к выводам вторичной обмотки трансформатора.

Приведенные на рис. 6 и рис. 7 временные диаграммы напряжения и тока наглядно демонстрируют эффективность работы сетевых реакторов на высокой несущей частоте для подавления высших гармонических сетевого напряжения и тока.

При расчете индуктивности сетевого фильтра АВ необходимо учитывать зависимость коэффициента гармоник напряжения и тока от коэффициента модуляции напряжения.

Для установления этой зависимости определим расчетные соотношения для напряжений

$U_{\text{вх.л}(1)}$ и $U_{\text{вх.л}}$. Импульсы напряжения, составляющие полуволну фазного напряжения АВ, имеют одинаковую амплитуду, равную U_{dc} / 2, а коэффициент скважности этих импульсов γ, пропорциональный синусоидальному напряжению управления, изменяется по синусоидальному закону $\gamma = \mu \sin \omega t$. Амплитуда первой гармоники фазного напряжения [2]:

$$U_{\text{вх.ф.}m(1)} = \mu U_{dc} / 2.$$

Действующее значение первой гармоники фазного напряжения трехфазного активного выпрямителя с синусоидальной ШИМ определяется по формуле (13):

$$U_{\text{вх.ф}(1)} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \mu U_{dc} = 0{,}3535 \mu U_{dc}. \qquad (13)$$

Действующее значение первой гармоники линейного напряжения трехфазного АВ с синусоидальной ШИМ $U_{\text{вх.л}(1)}$:

$$U_{\text{вх.л}(1)} = \sqrt{3} U_{\text{вх.ф}(1)} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \mu U_{dc} = 0{,}612 \mu U_{dc}, \quad (14)$$

где U_{dc} – напряжение цепи постоянного тока АВ.

Действующее значение всей волны кривой линейного входного напряжения АВ с синусоидальной ШИМ определим по методике, изложенной в [2].

С учетом временных зависимостей напряжений управления (5) нетрудно установить, что максимальная величина действующего значения отдельного импульса линейного напряжения, например $u_{\text{АВ}}$, имеет место при $\omega t = \pi/3$. Действительно, амплитуда импульса линейного напряжения при этом равна $u_{AB} = u_A - u_B = 0{,}5U_{dc} - (-0{,}5)U_{dc)} = U_{dc}$, а при μ = 1 коэффициенты скважности импульсов напряжения фазы А и фазы В одинаковы и равны

$$\gamma = \sin \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Таким образом, при принятых условиях действующее значение отдельного импульса линейного напряжения равно

$$u_{\text{и.л.д.з.}m} = U_{dc} \sqrt{\gamma} = U_{dc} \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2}} = 0{,}93 U_{dc}. \quad (15)$$

Напомним, что это значение является наибольшим (максимальным) значением. Величина действующего значения отдельных импульсов линейного напряжения на полупериоде напряжения сети переменного тока АВ определяется в этом случае по формуле (16):

$$u_{\text{и.л.д.з}} = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2}} U_{dc} \sqrt{\mu \sin \omega t} = 0{,}93 U_{dc} \sqrt{\mu \sin \omega t}. \quad (16)$$

Действующее значение линейного входного напряжения АВ:

$$U_{\text{вх.л.д.з}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_{\text{и.л.д.з}}^2 \, d\omega t} =$$

$$= \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_{dc}^2}{\pi} \mu \int_0^{\pi} \sin \omega t \, d\omega t} = U_{dc} \sqrt{\frac{\sqrt{3}\mu}{\pi}} =$$

$$= 0{,}742 U_{dc} \sqrt{\mu}. \qquad (17)$$

Из (16) и (17) видно, что коэффициент модуляции по сути характеризует степень регулирования входного напряжения АВ.

С учетом (14) и (17) коэффициент гармоник входного напряжения АВ с синусоидальной ШИМ $k_{\text{т.н1}}$ определяется по формуле (18):

$$k_{\text{т.н1}} = \frac{\sqrt{U_{\text{вх. л}}^2 - U_{\text{вх. л}(1)}^2}}{U_{\text{вх.л}(1)}} = \sqrt{\frac{\mu\sqrt{3} / \pi - 3\mu^2 / 8}{3\mu^2 / 8}} =$$

$$= \sqrt{\frac{8}{\pi\mu\sqrt{3}} - 1} = \sqrt{\frac{1{,}472}{\mu} - 1}. \qquad (18)$$

Обратим внимание на то, что формулы (14), (17) и (18) выведены при пренебрежении падением напряжения на элементах АВ при протекании по ним нагрузочной составляющей тока.

По формуле (18) можно рассчитать и построить зависимость коэффициента гармоник входного напряжения АВ от коэффициента модуляции $k_{\text{т.н1}} = f(u)$. Результаты расчета приведены в табл. 1.

По результатам расчетов, приведенным в табл. 1, на рис. 9 построен график зависимости коэффициента гармоник линейного напряжения

Таблица 1

Зависимость коэффициента гармоник линейного напряжения на входе АВ и параметра сетевого фильтра $\omega^2 LC$ от коэффициента модуляции при синусоидальной ШИМ

μ	1,0	0,93	0,66	0,5	0,33
$k_{\text{т.н1}}$	0,687	0,763	1,1	1,39	1,85
$\omega^2 LC \cdot 10^{-4}$, ГнФ/с^2	14,74	16,26	23,0	29,0	38,0

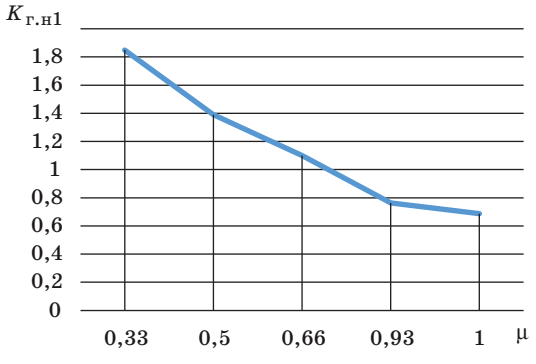


Рис. 9. Зависимость коэффициента гармоник линейного напряжения активного выпрямителя от коэффициента модуляции при синусоидальной ШИМ

на входе активного выпрямителя от коэффициента модуляции при синусоидальной ШИМ.

Отметим также, что по формуле (18) можно рассчитать коэффициент гармоник формы кривой в целом, не определяя спектр гармоник этой формы кривой напряжения. Уравнения (14), (16) и (18) позволяют определить зависимость интегрального параметра сетевого фильтра $\omega^2 LC$ от коэффициента модуляции и коэффициента режекции подавляемой гармоники с учетом того, что $k_{\text{г.н2}} k_\nu \gg 1$:

$$\omega^2 LC = \frac{1 + k_{\text{г.н2}} k_\nu / \nu^2}{1 + k_{\text{г.н2}} k_\nu} = \frac{1 + k_{\text{г.н2}} k_\nu / \nu^2}{k_{\text{г.н2}} k_\nu} = \\ = \frac{1}{k_{\text{г.н2}} k_\nu} + \frac{1}{\nu^2} = \frac{1}{\nu^2}\left(1 + \frac{U_\nu}{U_1 k_{\text{г.н2}}}\right). \quad (19)$$

Приняв допущение $U_\nu / U_1 \approx k_{\text{г.н1}}$, можно получить зависимость интегрального сетевого фильтра $\omega^2 LC$ от коэффициента модуляции, требуемой величины коэффициента гармоник напряжения, питающего АВ и порядкового номера высшей гармонической, имеющей наименьший коэффициента режекции:

$$\omega^2 LC \approx \frac{1}{\nu^2}\left(1 + \frac{k_{\text{г.н1}}}{k_{\text{г.н2}}}\right) \approx \frac{1}{\nu^2}\left(1 + \frac{\sqrt{1{,}472/\mu - 1}}{k_{\text{г.н2}}}\right). \quad (20)$$

Результаты расчета величины интегрального параметра сетевого фильтра $\omega^2 LC$ от коэффициента модуляции при принятых значениях $k_{\text{г.н2}} = 0{,}05$ и $\nu = 100$ приведены в табл. 1.

Амплитуду любой гармоники тока можно определить делением напряжения этой гармоники на полное сопротивление фазы для этой гармоники $i_\nu = u_\nu / z_\nu$.

Модуль полного сопротивления фазы для ν-ой гармоники

$$Z_{\text{фν}} = \sqrt{R_{\text{фν}}^2 + x_{\text{фν}}^2},$$

где $R_{\text{фν}}$ – эквивалентное активное сопротивление фазы с учетом увеличения активного сопротивления из-за эффекта вытеснения тока в проводниках при протекании по ним токов высокой частоты;

$x_{\text{фν}}$ – индуктивное сопротивление фазы;

$$x_{\text{фν}} = \nu x_{\text{ф(1)}};\ x_{\text{ф(1)}} = 2\pi f_{(1)} L_\text{ф}.$$

При пренебрежении эффектом вытеснения тока эквивалентное активное сопротивление фазы равно активному сопротивлению для основной гармоники тока и определяется по известной формуле

$$R_\text{ф} = P_\text{ф} / I_\text{ф}^2.$$

С целью упрощения можно выполнить расчеты в первом приближении без учета эффекта вытеснения тока, что в определенной мере может оказать влияние на точность расчета.

С учетом принятых допущений, если известен коэффициент гармоник напряжения, коэффициент гармоник тока можно определить по формуле (21):

$$k_{\text{г.т}} = k_{\text{г.н1}} \frac{\sqrt{R_\text{ф}^2 + x_{\text{ф(1)}}^2}}{\sqrt{R_\text{ф}^2 + \nu^2 x_{\text{ф(1)}}^2}} = \\ = k_{\text{г.н1}} \frac{\sqrt{1 + x_{\text{ф(1)}}^2 / R_\text{ф}^2}}{\sqrt{1 + \nu^2 x_{\text{ф(1)}}^2 / R_\text{ф}^2}}. \quad (21)$$

Поскольку $x_{\text{ф(1)}}^2 / R_\text{ф}^2 \ll 1$, формулу (21) можно представить в упрощенном виде:

$$k_{\text{г.т}} = k_{\text{г.н1}} \frac{1}{\sqrt{1 + \nu^2 x_{\text{ф(1)}}^2 / R_\text{ф}^2}}. \quad (22)$$

Здесь ν – номер наиболее сильно выраженной гармоники. Как показывают результаты исследования АВ, на достаточно большом диапазоне изменения коэффициента модуляции номер гармоники ν можно принять равным отношению $f_\text{н} / f_\text{с}$. Поскольку $\left(\nu x_{\text{ф(1)}} / R_\text{ф}\right)^2 << 1$, формулу (22) можно привести к виду

$$k_{\text{г.т}} = k_{\text{г.н1}} \frac{R_\text{ф}}{\nu x_{\text{ф(1)}}}. \quad (23)$$

Величину коэффициента гармоник сетевого напряжения $k_{\text{г.н2}}$ можно определить, если известны коэффициент гармоник входного напряжения АВ, индуктивность сетевого реактора $L_\text{р}$ и индуктивность сети $L_\text{с}$. При подключении АВ к сети переменного тока через сетевой трансформатор индуктивность $L_\text{с}$ определяется суммой индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора, приведенной к вторичной обмотке трансформатора.

$$k_{\text{г.н2}} = k_{\text{г.н1}} \frac{L_\text{с}}{L_\text{ф}} = k_{\text{г.н1}} \frac{L_\text{с}}{L_\text{р} + L_\text{с}}. \quad (24)$$

Выбор параметров сетевого фильтра АВ с учетом полученных выше зависимостей коэффициента гармоник напряжения и тока от коэффициента модуляции обеспечивает поддержание коэффициента мощности АВ на всем диапазоне регулирования напряжения в пределах от 0,95 до 1,0 (см. характеристику 2 на рис. 1).

Выводы

Полученные в работе расчетные соотношения позволяют:

– сравнить энергетические показатели управляемых выпрямителей, выполненных на не полностью и полностью управляемых вентилях;

– установить зависимость величины коэффициента гармоник входного напряжения АВ и интегрального параметра сетевого фильтра $\omega^2 LC$ от величины коэффициента модуляции при заданных значениях напряжения сети переменного тока, напряжения сети постоянного тока и допустимого значения коэффициента гармоник напряжения сети переменного тока;

– повысить точность расчета амплитуды пульсации тока и благодаря этому повысить точность выбора индуктивности сетевого реактора;

– выполнить расчет коэффициента гармоник тока в заданном диапазоне изменения коэффициента модуляции и нагрузки АВ.

Библиографический список

1. *Маевский О. А.* Энергетические показатели вентильных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 320 с.

2. *Мелешин В. И.* Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. 627 с.

3. Искажение формы кривой входного тока и напряжения активного выпрямителя / *А. А. Мартынов, Е. А. Крутяков, В. К. Самсыгин и др.* // Тр. Крыловского госуд. науч. центра. 2014. № 81 (365). С. 119–132.

УДК 621.3.078.4

О. В. Никулин
кандидат технических наук
ООО «Управляющая компания «Татбурнефть»

В. А. Шабанов
кандидат технических наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ

В статье рассмотрена система электроснабжения буровой установки с регулируемыми электроприводами основных механизмов. Разработана компьютерная модель системы электроснабжения буровой установки. Выполнено моделирование процессов при аварийных режимах в системе электроснабжения, изменениях условий бурения и т. д. Приведены результаты моделирования релейной защиты при коротких замыканиях в системе электроснабжения буровой установки и при изменяющихся условиях бурения скважины в процессе ее углубления.

Ключевые слова: *релейная защита, компьютерная модель, регулируемый электропривод, система верхнего привода, буровая лебедка, буровой насос.*

O. V. Nikulin
PhD, Tech.
“Management Company Tatburneft”

V. A. Shabanov
PhD, Tech.
Ufa State Petroleum Technical University

MODELING OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF A DRILLING RIG

Abstract. This article examines the power supply system of a drilling rig where the main mechanisms are driven by variable speed drives. A computer model of the power supply system of the drilling rig was developed. The modeling of processes at abnormal power supply modes and changes in drilling conditions, etc. was carried out. Results are presented of the modeling of the relay protection system in the case of short circuits in the power supply system of the drilling rig and during changes in drilling conditions in the course of the penetration process.

Keywords: *relay protection, computer model, variable speed drive, top drive system, draw works, mud pump.*

Электроснабжение буровых установок (БУ) осуществляется от промысловых сетей 6, 10 кВ либо от дизельных электростанций. Выбор того или иного варианта системы электроснабжения определяется рядом факторов: видом привода главных механизмов (электрический регулируемый, электрический нерегулируемый, дизель-электрический или дизельный); уровнем питающего напряжения; схемой компоновки оборудования. Причем в большинстве случаев электроснабжение БУ осуществляется в основном от слабых промысловых сетей соизмеримой мощности или автономных систем электроснабжения [1]. При этом повышаются требования к системам управления БУ [2, 3], усложняются условия работы электроприводов и релейной защиты и становятся более актуальными разработки компьютерных моделей электротехнических комплексов (ЭТК) БУ.

Компьютерные модели ЭТК БУ используют опыт разработки моделей систем релейной защиты [4], электродвигателей [5, 6] и систем электроснабжения [7]. Рассмотрим разработку компьютерной модели на примере ЭТК БУ-2000/125ЭП, однолинейная схема электроснабжения которой показана на рис. 1.

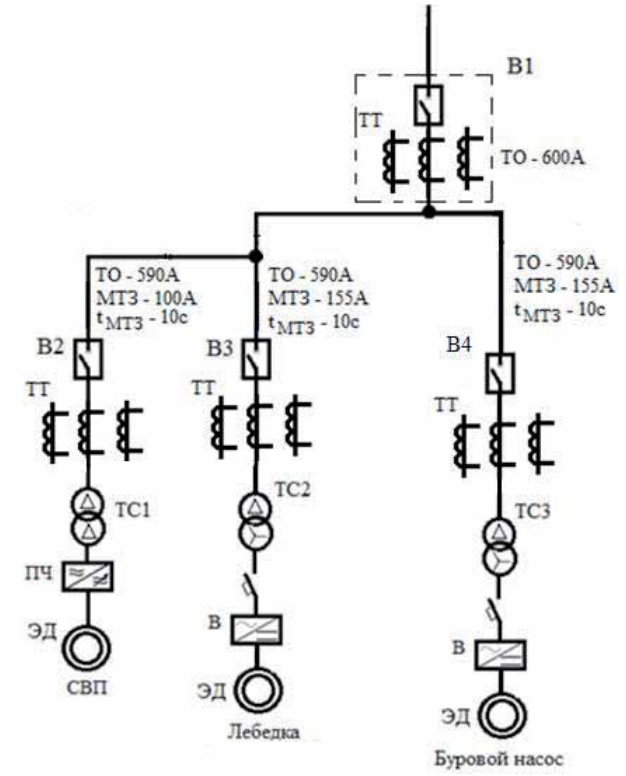


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения буровой установки БУ-2000/125ЭУ

Для создания и исследования ЭТК БУ будем использовать систему MATLAB, базирующуюся на алгоритмах векторных вычислений, обеспечивающую высокую скорость и точность вычислений, а также возможность визуального контроля протекающих в модели процессов. Объединение пакета Simulink и обширной библиотеки электротехнических блоков пакета SimPowerSystem в системе MATLAB обеспечивает возможность построения имитационных и функциональных моделей сложных электротехнических систем, к которым, несомненно, следует отнести и ЭТК БУ [8].

ВВ1 ... ВВ4 – высоковольтные вакуумные выключатели; ТС1 ... ТС3 – силовые сухие трансформаторы; ТТ – трансформаторы тока; ПЧ – преобразователь частоты; ЭД – электродвигатель; В – выпрямитель.

Разработанная модель ЭТК БУ содержит следующие блоки и подсистемы (рис. 2): «Источник напряжения – Three-PhaseSource», напряжение 6000 В, частота 50 Гц; «Воздушная линия – PowerLine» представлена блоком Three-PhaseSeries RLC Branch, в окно задания которого введены параметры системы внешнего электроснабжения; трехфазные выключатели переменного тока В1 ... В4, управление которыми осуществляется подачей сигнала на порт com. Единичный уровень управляющего сигнала вызывает замыкание ключей, а нулевой уровень является командой на размыкание ключей, при этом разрыв цепи в каждой фазе выполняется при достижении током этой фазы нулевого уровня [8]; для измерения тока и напряжения использованы измерители М1 ... М4; трехфазные трансформаторы – T_TD (6 кВ/600 В, 1100 кВА для питания системы верхнего привода (СВП)), T_DW (6 кВ/400 В, 1000 кВА для питания электропривода буровой лебедки (БЛ)), и T_MP (6кВ/400В, 1600 кВА для питания электропривода бурового насоса (БН)); выпрямитель R_TD и инвертор I_TD преобразователя частоты СВП; выпрямители постоянного тока электродвигателей (ЭД) БН, и БЛR_MP, и R_DW; дроссели на входе выпрямителей электроприводов БН, и БЛL_MP, и L_DW; электродвигатели AM_TD, DC_DW, DC_MP СВП, БЛ и БН соответственно.

Активные сопротивления и индуктивности обмоток трансформаторов, а также цепи намагничивания задаются в относительных единицах, которые вводятся в окна параметров трансформаторов.

В окна параметров электродвигателей (ЭД) введены значения активных сопротивлений и индуктивностей, полученные в процессе идентификации [6] электроприводов (ЭП) на БУ (данные из систем управления преобразователей частоты и преобразователя постоянного тока). С учетом рекомендаций, предложенных в [9], для ЭД использована stationary (постоянная) система отсчета для напряжений статора, являющихся неуравновешенными или прерывистыми.

Инвертор использует синусоидальную модуляцию [10], сигнал задания – синусоида частотой 50 Гц, несущая частота – треугольный сигнал частотой 1650 Гц. Это соответствует частотному коэффициенту модуляции $m_f = 33$ (50 Гц · 33 = 1650) [11]. Задатчик интенсивности ChirpSignal является оригинальной разработкой и вырабатывает трехфазный сигнал от начальной до конечной частот, задающихся в окне параметров, по закону U/f = const. Предусмотрено формирование как нарастания сигнала по указанному закону, так и уменьшения в зависимости от действующего значения частоты и задания на входе от блока Reference. Системы импульсно-фазового управления преобразователей постоянного тока обеспечивают управление двигателями с обратными связями по скорости и току. Данные о нагрузке ЭД считываются из mat-файла с помощью блоков формирования нагрузки, поступающих на вход TmЭД.

На рис. 3 представлена модель релейной защиты. Для контроля токов используем блок From, который извлекает данные из измерителя М. Системой MATLAB производятся вычисления амплитудных значений токов и напряжений, поэтому для получения действующего значения тока использован блок RMS, вычисляющий среднеквадратичное значение. Для обеспечения выдержки времени срабатывания МТЗ использован блок Discrete On/Off Delay.

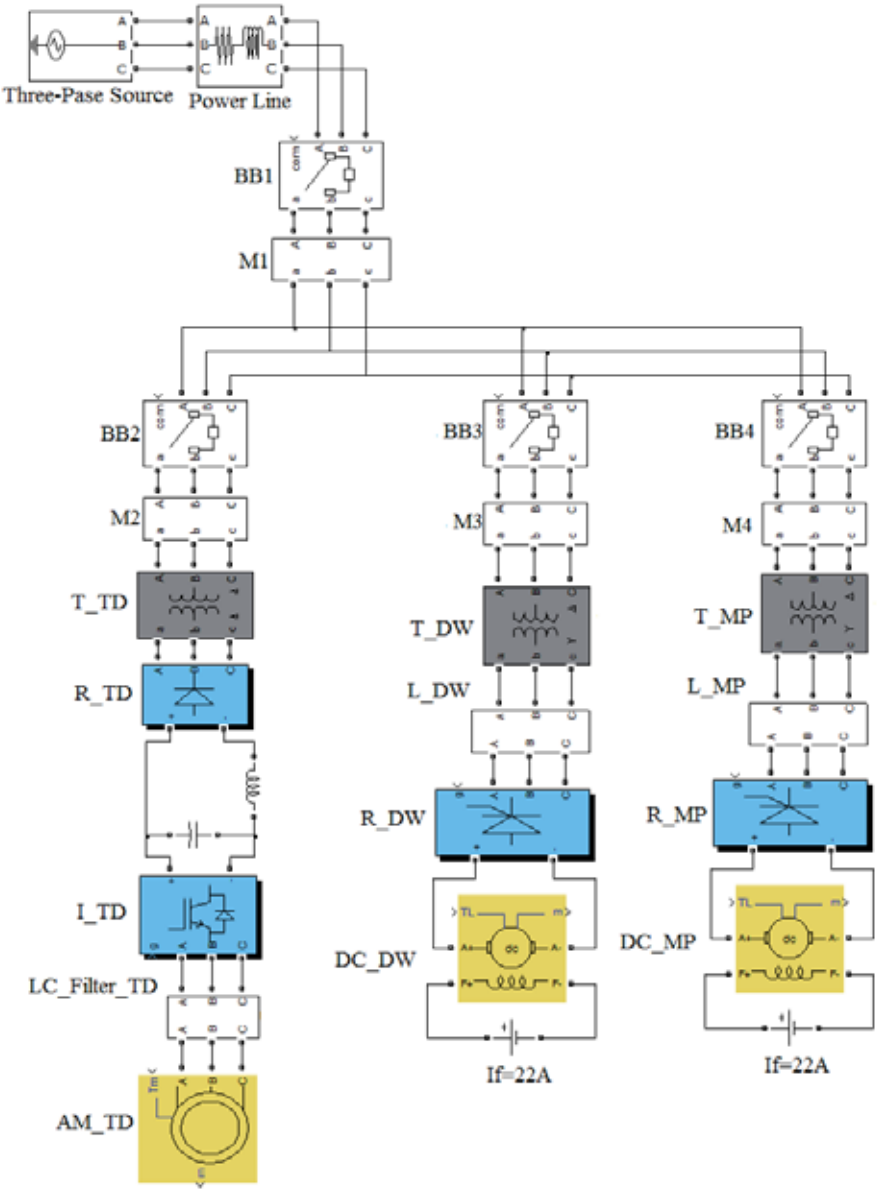


Рис. 2. Компьютерная модель ЭТК БУ

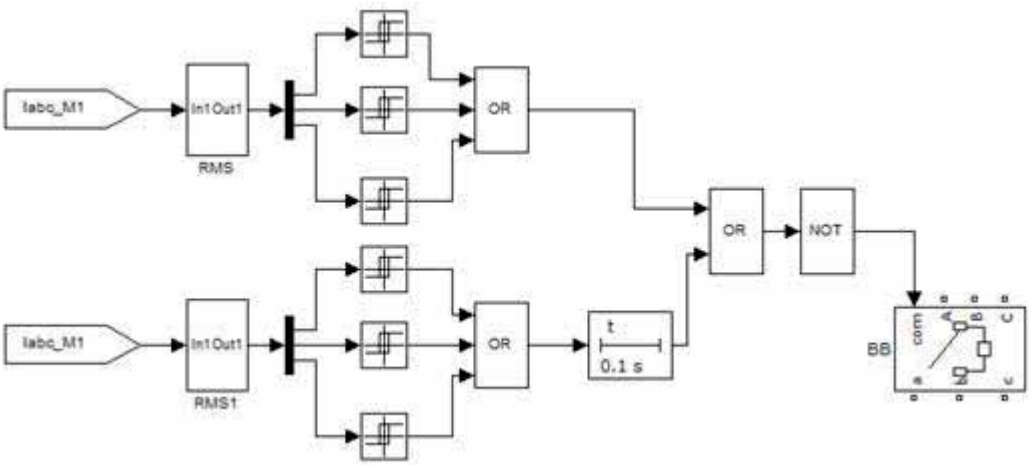


Рис. 3. Модель релейной защиты

Моделирование короткого замыкания за трансформатором T_MP, питающего ЭП БН, выполняется трехфазным короткозамыкателем Three-PhaseFault (рис. 4). В момент времени 6 с производится межфазное короткое замыкание. Результаты моделирования показаны на рис. 5.

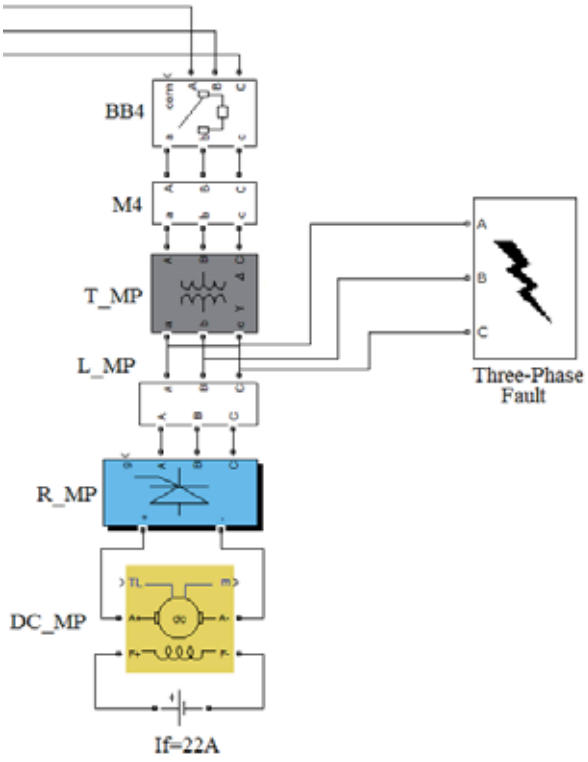


Рис. 4. Модель, имитирующая короткое замыкание

В результате моделирования было выявлено, что токи срабатывания релейной защиты (ТО на рис. 1) выбраны некорректно и не обеспечивают отключение выключателя при коротком замыкании. Поэтому они были снижены до 200 А, что обеспечило отключение выключателя при коротком замыкании за трансформаторами. Результаты моделирования трехфазного короткого замыкания за другими трансформаторами БУ так же показали необходимость корректировки токов срабатывания релейной защиты, что в дальнейшем было выполнено на действующих БУ.

Модель ЭТК БУ позволяет моделировать и исследовать электротехнические параметры при эксплуатационном бурении: на рис. 7–8 показаны результаты моделирования ЭТК БУ в процессе эксплуатационного бурения скважины № 32409 для интервала от 603 до 628 м – на глубину бурения одной бурильной свечи. Данные о нагрузке ЭД считываются из mat-файлов с помощью блоков формирования нагрузки на входах Tm и выгружены за рассматриваемый промежуток из системы контроля параметров бурения. Нагрузка на ЭД БЛ при этом поддерживалась постоянной для обеспечения заданной нагрузки на долото.

Из рис. 8 видно, что при небольшой глубине бурения в электрической сети наблюдается низкий коэффициент мощности. По мере углубления скважины увеличивается нагрузка бурового насоса, буровой лебедки, системы верхнего привода и ротора, что изменяет все параметры ЭТК, в том числе коэффициент мощности и качество электрической энергии [12, 13]. Это подтверж-

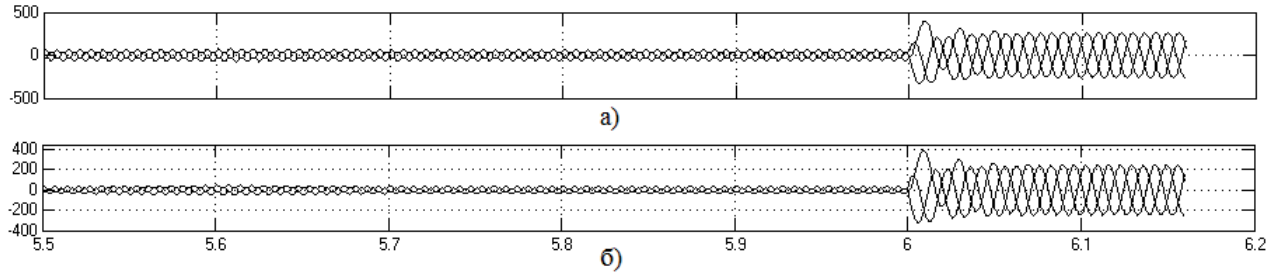


Рис. 5. Результаты моделирования короткого замыкания за трансформатором T_MP: а) токи в центре питания – за выключателем ВВ1; б) токи за выключателем ВВ4

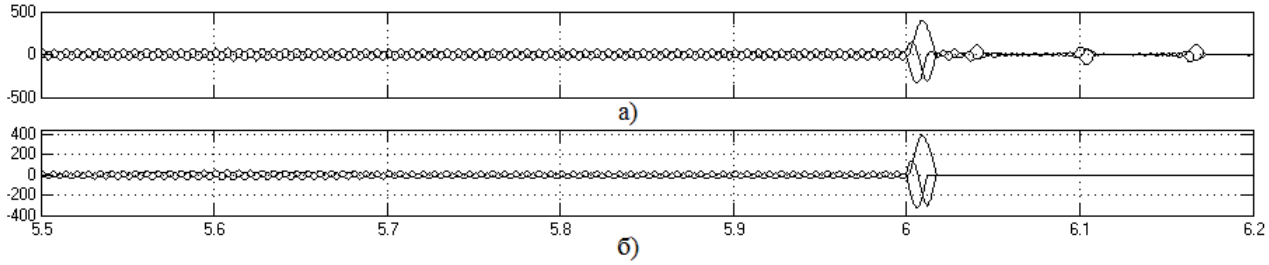


Рис. 6. Результаты моделирования короткого замыкания за трансформатором T_MP: со скорректированным током срабатывания релейной защиты на выключателе ВВ4 а) токи в центре питания – за выключателем ВВ1; б) токи за выключателем ВВ4

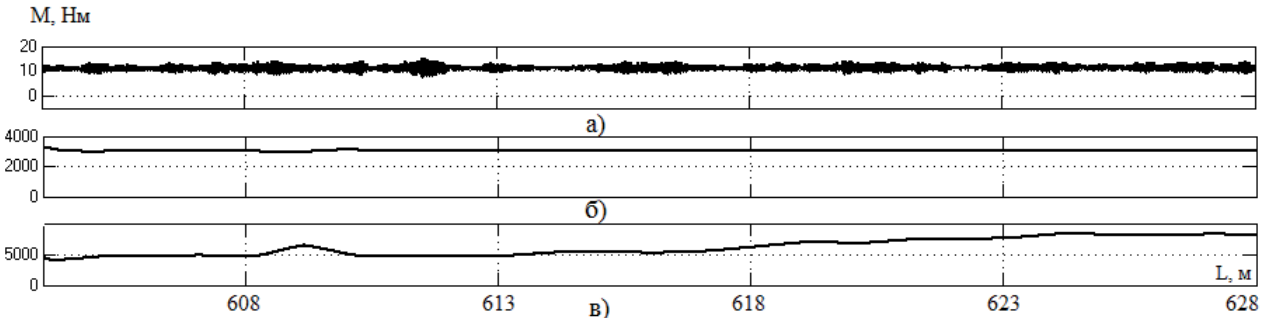


Рис. 7. Результаты моделирования электромагнитных моментов ЭД: а) электромагнитный момент ЭД СВП; б) электромагнитный момент ЭД БЛ; в) электромагнитный момент ЭД БН

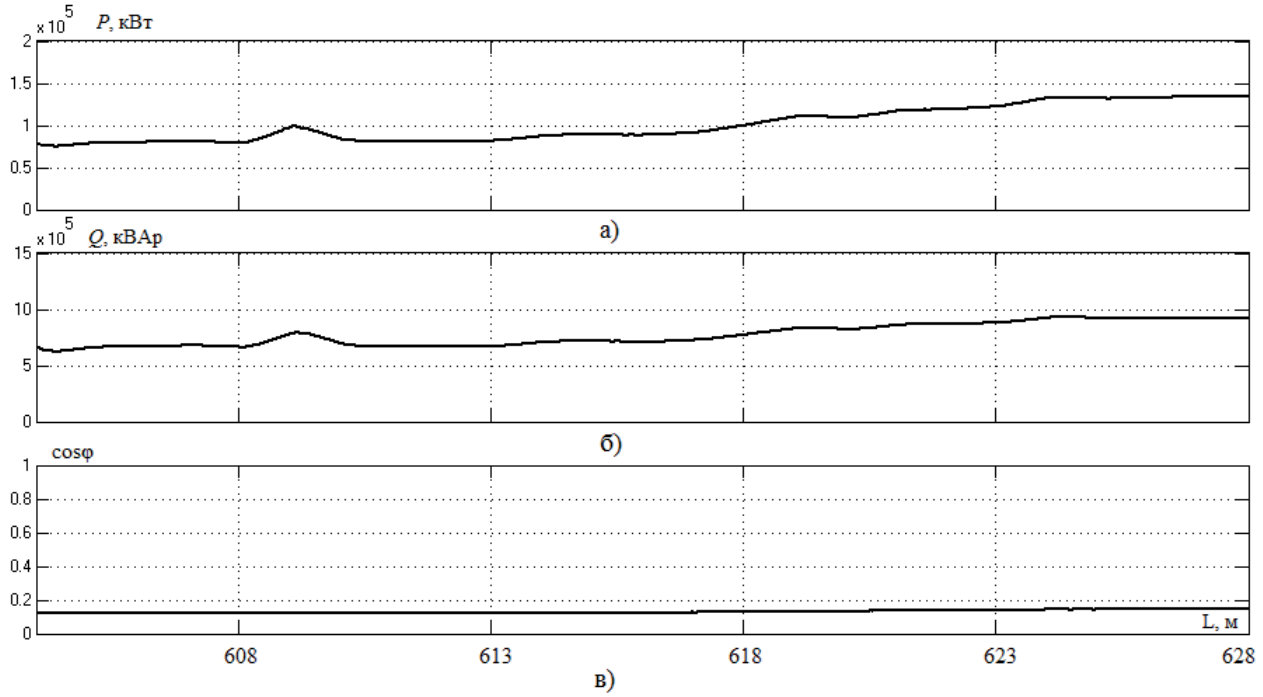


Рис. 8. Результаты моделирования активной (а) и реактивной (б) мощностей и коэффициента мощности (в) в центре питания БУ

дается результатами моделирования (рис. 7, 8), на которых видно, что при бурении скважины № 32409 на интервале 603–628 м с ростом нагрузки электродвигателей СВП, БН и БЛ коэффициент мощности увеличивается.

Выводы. Разработанная модель ЭТК БУ позволяет исследовать процессы в системе электроснабжения БУ при возникновении аварийных режимов, производить выбор токов срабатывания релейной защиты, а также исследовать процессы, протекающие в электроприводах во время бурения скважины с использованием фактических технологических параметров.

Библиографический список

1. *Шевырева Н. Ю.* Повышение качества электроэнергии при электроснабжении буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом: дис.... канд. техн. наук. М., 2016. 173 с.

2. Создание современных электротехнических комплексов для управления наземных и морских буровых установок / Абрамов Б. И., Кожаков О. И., Шиленков В. А. // Тр. VIII Междунар. XIX Всерос. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: Изд-во Мордовск. ун-та. 2014. Т. 2. С. 150–154.

3. *Лотфи Б., Салаххоор К.* Системы адаптивного управления бурением скважин // Электронный науч. журнал «Нефтегазовое дело». 2013. № 3. С. 1–17. URL: http://ogbus.ru/eng/authors/LotfiB/LotfiB_1.pdf

4. *Ivan Goran Kulis, Minea Skok.* Distribution Protection Relay Software Models in Interaction with Power System Simulators, 23rd International Conference on Electricity Distribution Lyon, 15–18 June, 2015.

5. *Adam Smolarczyk, Ryszard Kowalik, Emil Bartosiewicz*. The Real-Time Simulator for Protective Relays Testing Using MATLAB/Simulink Software, 18th Power Systems Computation Conference. Wroclaw, Poland, Aug. 18–22, 2014.

6. A Review on Parameters Identification Methods for Asynchronous Motor, (IJACSA) / Zhan Xing, Zeng Guohui, Liu Jin etc. // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. Vol. 6. Nr. 1. 2015.

7. *Федорова М. Ю.* MATLAB-моделирование как средство разработки исходной информации для конструирования и дизайна компенсированной системы электроснабжения буровой установки // Вестник Южно-Уральского госуд. ун-та. 2011. № 15. С. 36–39.

8. *Черных И. В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМКПресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

9. *Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D.* Analysis of Electric Machinery, IEEE Press, 2002.

10. Mohan, N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications and Design. N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1995. Section 8.4.1.

11. Power System Blockset User's Guide. The Mathworks Inc. 2000. 426 p.

12. *Шабанов В. А., Никулин О. В.* Регулируемый электропривод буровых насосов и его влияние на электрическую сеть // Rogtec. Российские нефтегазовые разработки. 2016. № 44. С. 70–81.

13. *Никулин О. В., Жиленков А. А., Черный С. Г.* Экспериментальные исследования качества электроэнергии на буровой установке с неавтономным питанием // Автоматизация в промышленности. 2017 (март). С. 39–42.

УДК 537.528

В. А. Сасаров
инженер
ООО «Новая Энергия»

А. С. Слободяник
инженер
ООО «Новая Энергия»

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО РАЗРЯДА В НЕФТИ

В статье предлагается использование импульсного источника питания для высокоинтенсивного разряда в нефти с целью снижения ее вязкости.

Ключевые слова: *разряд, нефть, транспортировка, вязкость, разрядная камера, электрогидродинамические удары.*

V. A. Sasarov
Engineer
“New Energy” ltd

A. S. Slobodyanik
Engineer
“New Energy” ltd

DEVELOPMENT OF A PULSED POWER SUPPLY FOR HIGH INTENSITY DISCHARGE IN OIL

The article proposes the use of switching mode power supply for high intensity discharge in oil to reduce its viscosity.

Keywords: *discharge, oil, transmission, viscosity, discharge chamber, electro hydro dynamics percussion.*

Часто поднимается вопрос о совершенствовании технологии добычи и транспортировки нефти. Одним из основных физических свойств нефти является вязкость, которая может достигать значений, при которых добыча и перекачка становятся затруднительными.

В работе рассмотрена энергоэффективность воздействия электрогидродинамическими разрядами. Предметом исследования является воздействие электрогидродинамическими разрядами и разработка устройства по созданию высокоинтенсивных электрических разрядов.

Суть метода заключается в воздействии на формируемый поток нефти электрогидродинамическими ударами. Это приводит к развитию кавитации, формированию импульсов давления и интенсификации тепло- и массообменных процессов. Происходит разрыв химических связей с образованием свободных радикалов, изменение физико-химических свойств нефти, уменьшение плотности и др.

Целью работы является разработка и исследование способа снижения вязкости нефти при воздействии на поток жидкости короткоимпульсными электрическими разрядами необходимой мощности. Такой способ показал себя наиболее эффективным. В процессе работы проведено исследование источника, осуществляющего данные разряды. Предложена схема силовой части и схема управления установки.

Для получения разрядов используется источник высокого напряжения, включающий: повышающий трансформатор, выпрямитель по схеме удвоения, разрядный конденсатор и коммутационный разрядник.

Предложен вариант опытного образца разрядной камеры с 3 вариантами разрядных устройств.

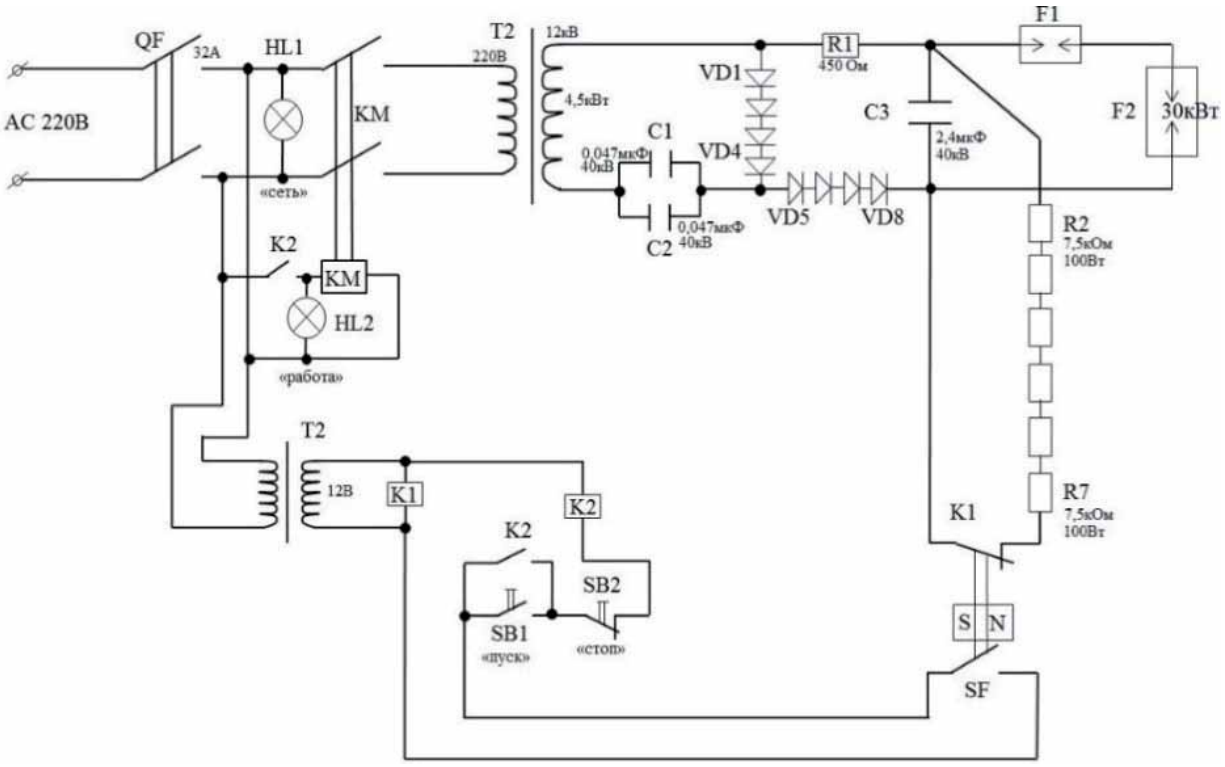


Рис. 1. Схема силовой части и схема управления установки

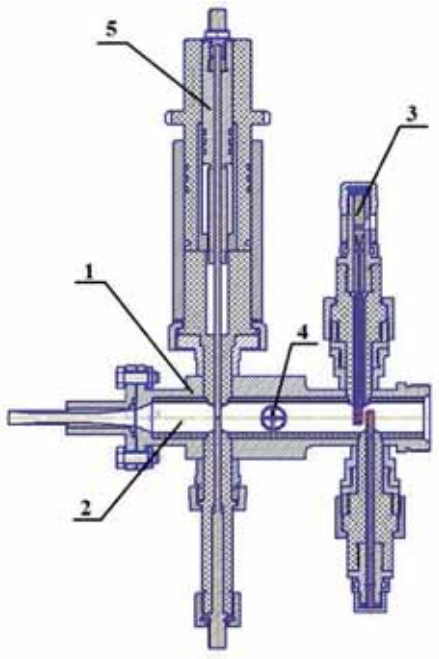


Рис. 2. Вариант опытного образца разрядной камеры: 1 – разрядная камера; 2 – рабочая зона разрядной камеры; 3 – разрядное устройство с параллельными электродами и вдувом газа в зону разряда; 4 – разрядное устройство типа «автомобильная свеча»; 5 – разрядное устройство с радиальными электродами и автоматическим регулированием зазора между ними

Результаты представленной работы могут рекомендоваться к внедрению на всех этапах нефтепереработки.

Библиографический список

1. *Sergey Rakhinskiy, Nicolai Novikov.* Treatment Process and Apparatus for Reducing High Viscosity in Petroleum Products, Derivatives, and Hydrocarbon Emulsions and the Like // United States Patent Application Publication Pub. Nr.: US 2014/0130400 Al Saidakovsky et al. (43) Pub. Date: May 15, 2014.

УДК 629.735.33

С. С. Тимофеев
старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье представлен обзор перспективных источников энергии в судовых энергетических системах.

Ключевые слова: *альтернативные источники энергии, автономные энергетические системы, судовые источники питания, перспективные источники для судовых систем.*

S. S. Timofeyev
Senior Lecturer
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY FOR SHIP POWER SYSTEMS

The article covers an overview of the promising sources of energy in marine power systems.

Keywords: *alternative energy sources, autonomous power system, shipboard power sources, prospective sources for shipboard systems.*

Указом президента Российской Федерации 2017 год назначен годом экологии, поэтому проблема использования альтернативных источников энергии на судах, позволяющая снизить вредные выбросы и уменьшить затраты на традиционное топливо, представляется особенно актуальной.

Актуальность данного вопроса обусловлена и тем фактом, что суда в процессе эксплуатации используют большое количество топлива, что

Рис. 1. Разделение альтернативной энергетики

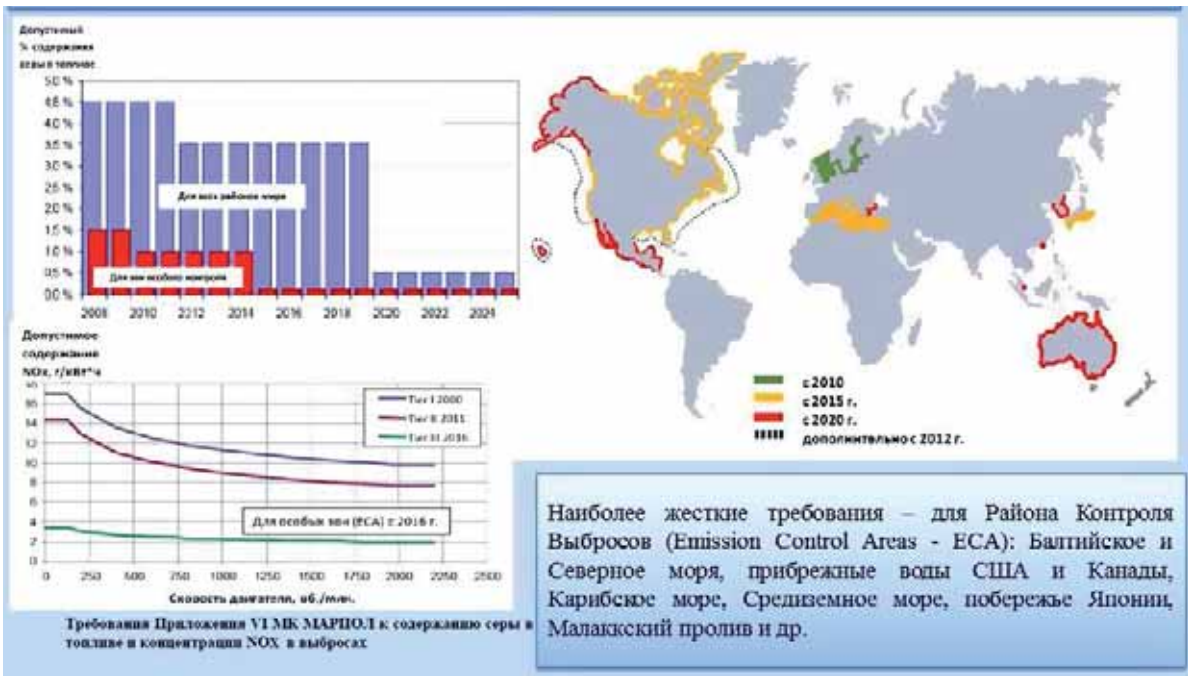


Рис. 2. Требования по количеству вредных выбросов

пагубно сказывается на состоянии окружающей среды. Например, танкеры и газовозы с большим водоизмещением ежегодно выбрасывают в атмосферу миллионы кубометров углекислого газа, нанося огромный вред атмосфере. С другой стороны, постоянно изменяющийся курс цен на нефтепродукты и ограниченные запасы ископаемых ресурсов вынуждают переходить на альтернативные виды топлива и источники энергии.

На сегодняшний день можно выделить два основных вида альтернативной энергетики: первый, когда энергетика ограничена погодными условиями и техническими возможностями систем, и второй, когда она ограничена природными ресурсами [1].

К ветряной энергетике можно отнести различные типы турбин, установленных на судах. Солнечная предполагает использование солнечных батарей в качестве источников электрической энергии. Рассматривая гидроволновую энергетику, следует отметить использование гидрогенераторов на судах. Термальная энергетика направлена на использование в качестве топлива природного газа.

По данным Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененной протоколом 1978 г., количество вредных выбросов с каждым годом должно снижаться, что заставляет производителей переходить на альтернативные источники энергии. Наиболее жесткие требования предъявляются к Балтийскому и Северному морям, прибрежным водам США и Канады, Карибскому морю, Средиземному морю, побережью Японии. Из графиков рис. 2 следует, что допустимое содержание серы и оксидов азота не должно превышать к 2020 г. 0,5% и 2 г/кВт*ч соответственно [2].

Сравнительные количественные показатели вредных выбросов при сжигании традиционных судовых топлив показывают, что наибольшее количество выбросов происходит при сжигании мазута, который является одним из самых распространенных видов топлива. Как альтернатива данным видам топлива могут рассматриваться:

– сжиженные и компримированные горючие газы;
– спирты;
– биотопливо;
– водотопливная эмульсия;
– водород.

В табл. 1 представлены сравнительные данные использования альтернативных источников энергии и их доступность для судоходства. К ним относится ветроэнергетика, гелиоэнергетика, осмотическая энергетика, новые виды топлива [3].

Рассмотрим применение ветроэнергетики для судов. Исходя из существующей карты ветров, видно, что скорость ветра на воде может составлять от 5 до 20 м/с, что хорошо сказывается на использовании энергии ветра на судах (рис. 3) [4].

Использование классического паруса вызывает определенные трудности по установке мачт, такелажа и увеличению команды для обслуживания. Корабль Royal Clipper – самое большое парусное судно в мире, которое при любой погоде пересекает океан, парусник был построен в 2000 г. Ниже представлен новый вид парусного движителя – система Skysails. Стоимость системы 1,5 млн долл. Рассмотрим эту систему более подробно.

Таблица 1

Данные использования альтернативных источников энергии

Направления альтернативной энергетики	Источник энергии	Доступность источника для судоходства
Геотермальная энергетика	Тепло планеты	Недоступно
Гидроэнергетика	Движение воды в реках и морях	Недоступно
Осмотическая энергетика	Перепад давления в осмотической мембране	Доступно
Гелиоэнергетика	Излучения солнца	Доступно
Ветроэнергетика	Движение воздушных масс	Доступно
Новые виды топлива	Сжигание	Доступно в пределах запаса топлива

Система Skysails значительно упрощает использование паруса, который может подниматься на высоту 200–300 м. Фактически система состоит из паруса площадью 160 м^2, который с помощью тросов поднимается на определенную высоту, и системы управления, обеспечивающей максимальное использование энергии ветра при различных курсах. На рис. 4 показаны возможные курсы судна относительно направления ветра. Кроме того, высота паруса обеспечивает малый крен судна [5].

Beluga SkySails – первый в мире коммерческий сухогруз с летающим парусом от германской компании SkySails. 132-метровое судно, принадлежащее компании Beluga Group, прошло церемонию «крещения» 15 декабря 2007 г., а 18 января 2008 г. Beluga SkySails совершило первое испытательное плавание в Северном море, в ходе которого была проверена работа паруса (рис. 5).

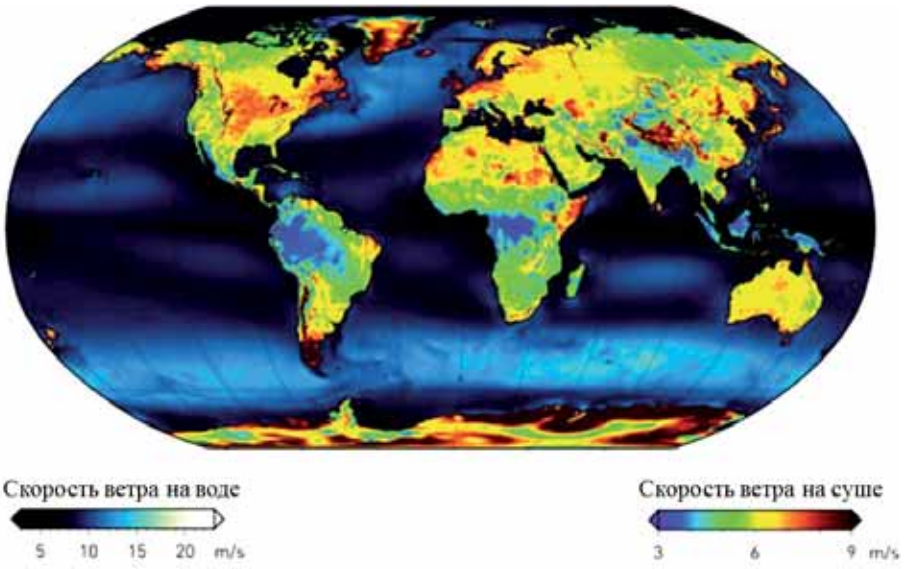


Рис. 3. Карта ветров

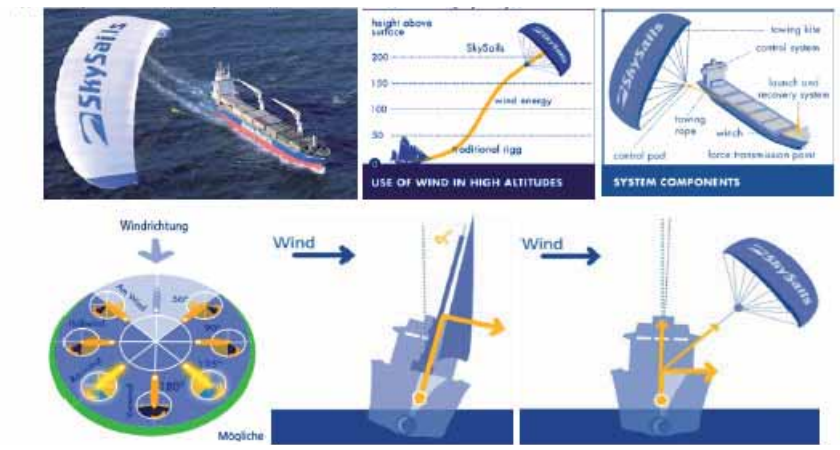


Рис. 4. Использование системы SkySails

Рис. 5. Испытание системы Skysails в Северном море

Специалисты SkySails и Beluga Group подсчитали, что летающий парус сократит расход топлива сухогрузам примерно на 10–35% за год, причем при самых удачных условиях текущий расход горючего с поднятым парусом падает у такого судна на 50%. Еще один представитель системы SkySails – траулер Maartje Theadora (рис. 6) является самым большим рыболовным судном в Германии и принадлежит фирме Sassnitz-based Westbank Hochseefischerei GmbH, которая входит в состав группы компаний Parlevliet. В табл. 2 приведены основные параметры судна.

7 октября 2009 г. был подписан первый контракт на поставку парусного движителя в виде воздушного змея, который установлен на рыболовецком траулере ROS-171 *Maartje Theadora*. Тяга паруса площадью 160 м^2 сравнима с тягой двигателя аэробуса A318 и составляет примерно 48000 Н.

Рис. 6. Рыболовецкий траулер ROS-171 Maartje Theadora с системой SkySails

Таблица 2

Параметры траулера Maartje Theadora

Длина траулера	141 м
Силовая установка	*MAN*
Общая мощность	11750 л. с.,
Движитель системы SkySails	парус общей площадью 160 м^2

Рис. 7. Выдвижные паруса Wind Challenger

Рассмотрим далее проект Токийского университета Wind Challenger (рис. 7).

При использовании гигантских выдвижных парусов, размеры которых составляют 50 метров в высоту и 20 метров в ширину, годовой расход топлива может быть снижен почти на 30%.

Стоимость парусов составляет около 2,5 млн долларов каждый. Долговечность системы и скорость судна помогут окупить затраты в течение 5–6 лет. Считается, что такое судно будет построено в ближайшие годы. Паруса могут быть установлены на его палубе.

Для разработки потребовалось много времени. Для получения максимальной тяги паруса управляются индивидуально, и каждый парус представляет собой телескопическое устройство с пятью ярусами, что позволяет складывать их, когда погода становится неблагоприятной. Паруса полые и изогнутые, изготовлены из алюминия или армированного пластика, что делает их более похожими на крылья. Компьютерное моделирование, а также испытания в аэродинамической трубе показали, что данная система способна работать даже при боковом ветре. Таким образом, проект Wind Challenger действительно может стать направлением развития экономичных судов будущего поколения.

Рассмотрим применяемые ветротурбины. Как известно, коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) парусом невелик и составляет 0,2 о. е., недостатки ротора Савониуса также хорошо известны: эта турбина является самой тихоходной и, как следствие, имеет очень низкий коэффициент использования энергии ветра – всего 0,18–0,24 и КПД 17–18%. Применение этих турбин экономически и технически нецелесообразно.

Турбины с горизонтальной осью вращения, использующие подъемную силу, хорошо заре-

комендовали себя в ветрогенераторах большой мощности до 10–15 МВт. Возможно их применение на автоматизированных судах.

Одним из примеров использования ветрогенераторов является произведенный компанией ASV Unmanned Marine Systems 350-килограммовый катамаран C-Enduro, работающий с помощью ветровой и солнечной энергии и дизеля (рис. 8). Он отправился в плавание из валлийского города Милфорд-Хейвен 20 августа 2015 г. для исследования акватории Кельтского моря [6].

Французский инженер Жорж Дарье получил патент на вертикальную турбину в 1931 г.

Ее достоинства:

– нет необходимости направлять ось на поток ветра;

– бесперебойная работа даже при штормовом ветре;

– низкие виброшумовые характеристики;

– требуется минимум места для установки.

Рис. 8. Катамаран C-Enduro

Рис. 9. Паром Stena Jutlandica с ветряными турбинами

Рис. 10. Ролкер E-Ship 1

В компании Stena Line решили использовать энергию ветра при эксплуатации своих огромных паромов. Специалисты из компании Stena Line собираются установить на носу одного из своих паромов, а именно на Stena Jutlandica, две огромные ветряные турбины высотой в четыре метра каждая.

Эффект Магнуса – физическое явление, возникающее при обтекании вращающегося тела потоком жидкости или газа. Образуется сила, воздействующая на тело и направленная перпендикулярно направлению потока. Это является результатом совместного воздействия таких физических явлений, как эффект Бернулли и образования пограничного слоя в среде вокруг обтекаемого объекта.

Одно из первых современных воплощений концепции «нео-парусника» – транспортного корабля, способного экономить горючее за счет энергии ветра, – это 10500-тонный ролкер, построенный в 2010 г. в Киле (рис. 10) [7].

Четыре колонны в центре корпуса, каждая из которых имеет высоту 27 м и диаметр 4 м, представляют собой т. н. «роторный парус», изобретенный немецким инженером Антоном Флеттнером еще в начале прошлого века.

В основе концепции Флеттнера лежало использование эффекта Магнуса. Раскрученные роторы способны производить движущую силу, и при определенных обстоятельствах эта сила может превосходить затраты энергии на раскручивание роторов. Для судовых ветряных систем встречного принципа действия наиболее эффективным является использование электрогенераторов с барабанными ветряными колесами, установленными вплотную на лобовой поверхности надстроек судна.

Использование солнечной энергии позволит полностью заменить ДВС на судне. Одним из ярких примеров использования солнечной энергии является катамаран на солнечных панелях Turanor Solar Planet [8], показанный на рис. 11.

Размеры лодки – 31 м в длину и 15 м в ширину. Высота судна над ватерлинией – 6,1 м. На лодке без проблем может разместиться 50 пассажиров. Верхняя палуба яхты – площадка в 536 «квадратов», полностью покрытая солнечными

Рис. 11. Катамаран Turanor Solar Planet

батареями. Батареи при КПД 18,6% позволяют вырабатывать около 93 кВт энергии.

Швейцарский катамаран Sun21 (рис. 12), также являющийся представителем использования солнечной энергии, был официально окрещен водой Рейна и стартовал 16 октября 2006 г. в швейцарском г. Базеле. Пройдя Северным морем вдоль берегов Голландии, Бельгии, Португалии и Франции, к вечеру 20 ноября катамаран дошел до испанской Севильи, откуда и начал свой трансатлантический переход.

Солнечные батареи дают возможность путешествовать в безветренную погоду, они вырабатывают электрический ток, достаточный для подзарядки аккумуляторов, даже в пасмурный день. В такие дни солнечная лодка идет со скоростью 5–6 узлов и проходит за день более 80 миль. Ну а в солнечную погоду катамарану удавалось проходить до 107 морских миль [9].

Это первое судно, пересекшее Атлантический океан на солнечной энергии.

– длина катамарана – 14 м;

– площадь солнечных батарей – 60 м^2;

– в трюме расположены аккумуляторы.

Стоит отметить, что существующие технологии и размеры современного судна позволяют разместить фотоэлементы, генерирующие не более 400–500 кВт мощности стоимостью 1,5–2,3 млн долл. со сроком службы до 30 лет [10].

Рис. 12. Катамаран Sun21

Рис. 13. Плавучий робот Wave Glider

Устройства, разработанные стартапом Liquid Robotics, отличаются от своих предшественников гражданского и военного назначения, которые изучают океаническую среду, фауну и флору из-под воды. Wave Glider («Скользящий по волнам») движется по водной глади за счет изменения плавучести отдельных частей своего корпуса, которое приводит к тому, что волны толкают его в нужном направлении. Управление производится удаленным оператором через спутниковую связь.

Поскольку верхняя часть этого похожего на доску для серфинга аппарата находится над водой, на нее установили солнечные батареи. Энергия солнца используется для питания навигационного, исследовательского и другого оборудования, установленного на борту устройства и его подводном элементе, который крепится к днищу с помощью троса.

Заключение. В настоящее время во многих странах мира ведутся активные работы по использованию альтернативной энергетики на судах различного назначения с целью минимизации вредного воздействия на окружающую среду [11].

Библиографический список

1. *Настасенко В. А.* Технико-экономический анализ производства и эксплуатации судовой альтернативной энергетики // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 4 (55).

2. *Кемпбел К.* Грядущий нефтяной кризис. М.: Группа независимых издателей, 1997. 210 с.

3. *Шурляк В. К.* Применение альтернативных видов энергии и альтернативных топлив на морских судах / СПГ как альтернативное топливо для морских судов: матер. Всерос. семинара. СПб.: ГМА им. Макарова, 2012. 24 с.

4. COP-21. Парижский Всемирный Саммит 2015 года по проблемам климата.

5. Zeppelin SkySails, Sales and Servise. Hamburg, 2007. 32 p.

6. [Электронный ресурс]. URL: www.korabel.ru/filemanoger/OTHER/0/0/3.pdf.

7. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ecomarinepower,com/en/energysail.

8. [Электронный ресурс]. URL: http://alternathistory.org.ua/turanor-planet-solar-samoebolshoe-v-mire-sudno-na-solnechnikh-batareyakh.

9. [Электронный ресурс]. URL: www.solarwave-yachts.com.

10. [Электронный ресурс]. URL: http://korabley.net/news/2008-12-08-73.

11. Материалы совместного заседания по альтернативным судовым энергетическим системам секции электромеханики и автоматики им.профессора В. И. Полонского и Российского науч.-техн. общества судостроителей им. академика А. Н. Крылова.

УДК 621.333.3

С. Н. Трубенева
старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

А. В. Болтнева
студентка
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ НА СУДАХ

В статье представлены существующие судовые системы электродвижения. Рассмотрены достоинства и недостатки данных систем. Представлены перспективные системы для применения в будущем.

Ключевые слова: *система электродвижения, суда, движитель, кольцевая конструкция.*

S. N. Trubeneva
Senior Lecturer
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

A. V. Boltneva
Student
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ELECTRICITY SYSTEM ON SHIPS

Nodal ship electric propulsion systems are presented in the article. The advantages and disadvantages of these systems are considered. Perspective systems for future use are presented.

Keywords: *Electric propulsion system, ships, thruster, ring structure.*

Система электродвижения (СЭД) – это комплекс взаимосвязанных устройств и электрооборудования, который позволяет реализовать принцип электродвижения судов, которое зародилось почти 150 лет назад и связано с именем известного ученого академика Б. С. Якоби. В 1834 году Якоби построил электродвигатель, основанный на принципе притяжения и отталкивания между электромагнитами. Двигатель работал от гальванических батарей и являлся самым совершенным электротехническим устройством [1].

Но с каждым годом в связи с ужесточением производственных требований происходит усовершенствование СЭД, вследствие чего меняется ее состав.

Например, сегодня СЭД переменно-постоянного тока, представленная на рис. 1, включает:

– источники энергии – генераторы (Г) с первичными двигателями (ПД);

– силовые полупроводниковые преобразователи (ПП);

– гребные электродвигатели (ГЭД);

– возбудители генераторов (ВГ) и гребных электродвигателей (ГД);

– щит электродвижения (ЩЭД);

– пульт управления электродвижением (ПЭД);

– посты дистанционного управления (ПДУ);

– щитки сигнализации (ЩС).

Чтобы судно могло двигаться с постоянной скоростью, к нему нужно приложить движущую силу, равную силе сопротивления при этой скорости и противоположно направленную.

Существует множество различных движителей (колесные, винтовые, плавниковые, крыльчатые и водопроточные). Но на большинстве современных судов с СЭД в качестве движителей применяются гребные винты (рис. 2). По сравнению с другими движителями гребной винт имеет меньший габарит, более высокий КПД и может применяться при значительной мощности гребной установки [2].

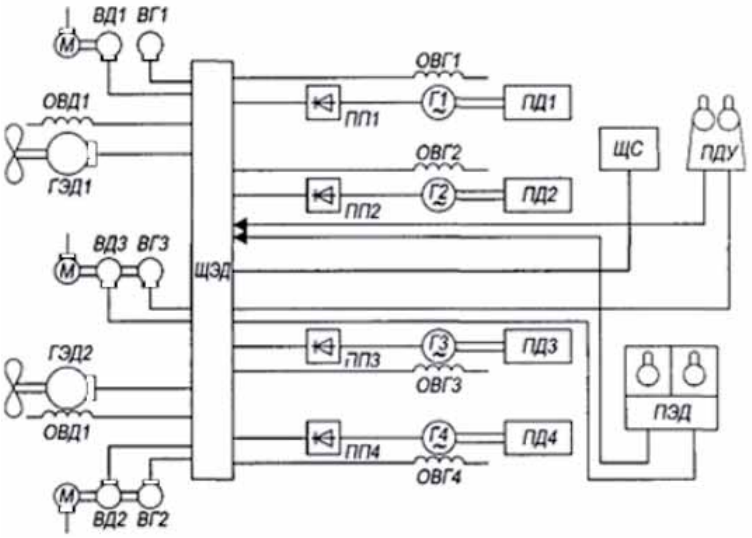


Рис. 1. Функциональная схема СЭД [1]

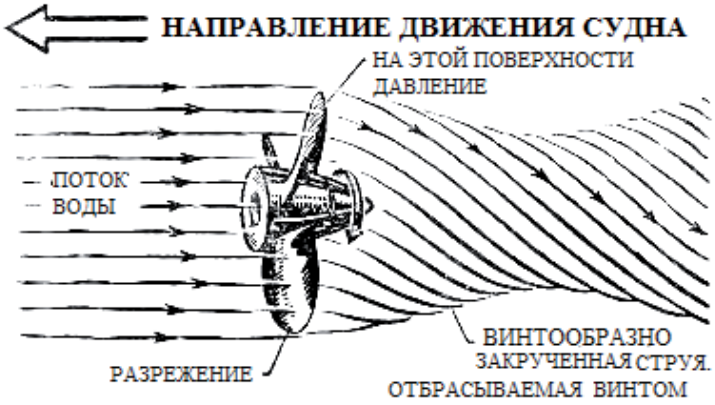


Рис. 2. Принцип действия гребного винта

При проектировании каждого судна необходимо выполнять определенные требования, которые влияют на выбор структуры СЭД.

Например, если требуется плавное регулирование частоты вращения винта в широком диапазоне, частые и глубокие изменения момента, быстрые и многократные реверсы (повышенная маневренность), то чаще всего используют гребные электрические установки (системы электродвижения) постоянного тока. Они имеют в своем составе главные генераторы и гребные электродвигатели постоянного тока, которые обычно соединяются по схеме «генератор – двигатель» (Г–Д). К таким судам относятся ледоколы («Санкт-Петербург», «Капитан Сорокин»), буксиры («Ингур», «Карский-1»), паромы («Николай Аксененко», «Амбал»), плавкраны, транспортные суда ледового плавания.

А если не требуются частые реверсы гребного винта, плавное изменение частоты вращения гребного вала в широком диапазоне и специальные характеристики электропривода движителя (транспортные, пассажирские, рефрижераторные суда), используются синхронные генераторы и ГЭД переменного тока (синхронные или асинхронные) [3].

В СЭД переменного тока также необходимо выбрать правильное расположение составных элементов СЭД, для того чтобы обеспечить способность судна оставаться на плаву, сохранять мореходные качества и выполнять функции, соответствующие его назначению, при повреждениях корпуса и затоплении части помещений.

Расположение главной паровой энергетической установки определяется в основном назначением судна. На транспортных судах ее обычно размещают в середине судна: ближе к корме – машинное отделение, ближе к носу – котельное отделение. Между отделениями устанавливают поперечные водонепроницаемые переборки. На танкерах и лесовозах главную энергетическую установку располагают в кормовой части судна. На судах небольшого водоизмещения главные парогенераторы и главные двигатели уста-

навливают в одном общем отсеке – машинно-котельном отделении. На судах с двигателями внутреннего сгорания машинное отделение обычно состоит из одного помещения, расположенного, как правило, в кормовой части судна. На больших океанских судах – лайнерах может быть несколько машинных отделений, с несколькими ГЭД различных мощностей, как показано в табл. 1 [4].

По сравнению с гребными установками других типов гребные электроустановки имеют две следующие характерные особенности: отсутствие жесткой механической связи между валами первичных двигателей и движителей и большое число факторов, влияющих на выбор оптимальных параметров установки. Эти особенности дают возможность при проектировании подавлять недостатки и усиливать достоинства стороны ГЭУ [5].

Необходимо отметить следующие достоинства электроустановок и при проектировании, и при эксплуатации:

– возможность применять быстроходные первичные двигатели и главные генераторы;

– возможность выбирать оптимальные параметры первичных двигателей и движителей;

– возможность широко стандартизировать и унифицировать отдельные части установки;

– возможность упрощать конструкции первичных двигателей, используя их нереверсивные типы;

– возможность уменьшать длину гребных валов;

– возможность уменьшать длину главных паропроводов в случае ГЭУ с паропроводными турбинами;

– возможность широко применять системы контроля и автоматики;

Таблица 1

Примеры морского транспорта с ГЭД

Производитель	Напряжение СЭС, кВ	Количество ГЭД, шт.	Мощность одного ГЭД, МВт
Wartisila (финская публичная машиностроительная компания)	0,69	2	1
		2	5,4
	6,3 (Буровое судно «Шашин»)	6	1,38
	4,16 (Ледокол Henry Larsen)	2	6
ABB (швед-ско-швейцарская компания)	0,69 (гибридные пропульсивные установки)	2	2,7
	0,69 (Азипод)	2	5,4
	6,3 (Ледоколы «Таймыр», «Вайгач»)	3	12
	6,3 (Азипод)	2	8,5
	6,3 (Азипод)	1	10
	11 (танкеры)	1	12

– повышенная надежность и живучесть ГЭУ;

– широкая возможность дистанционного управления установкой;

– повышенные маневренные качества ГЭУ;

– относительная экономичность при работе ее на промежуточных ходах;

– возможность улучшить использование навигационного времени; удобство управления, обслуживания и контроля [6].

К основным возможным недостаткам систем электродвижения судов относятся:

1. Все механические и электрические ВРК (винторулевые колонки) мощностью свыше 400–500 кВт в настоящее время закупаются за рубежом, отсюда возникает проблема высокой стоимости и большие затраты на ремонт, необходимость разработки и изготовления подобного российского оборудования.

2. Полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) на базе неуправляемых выпрямителей являются необратимыми, а следовательно, невозможно осуществить рекуперативное торможение СЭД, устранить данный недостаток возможно при применении в составе СЭД на базе ППЧ. Активная мощь в ППЧ может протекать в обоих направлениях, что позволяет осуществлять рекуперативное торможение СЭД.

3. Преобразователь снижает качество электроэнергии в судовой сети, что приводит к необходимости применения трех обмоточных трансформаторов или СЭД, которая оказывает минимальное влияние ППЧ на качество электроэнергии в судовой сети [7].

Для решения этих вопросов в рамках федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 гг. создается новый тип СЭД на базе двигательно-движительных систем кольцевой конструкции с погружным электроприводом (ДДС КК) (рис. 3).

Принципиально новым элементом в ДДС КК по сравнению с другими типами винторулевых колонок (ВРК) является погружной ГЭД кольцевого типа, совмещенный с гребным винтом. Благодаря интеграции двигателя и движителя в единую конструкцию, в отличие от традиционных ВРК с Z-образной и L-образной передачами, в ДДС КК отсутствуют тяжелые валы и сложный, дорогостоящий, громоздкий конический редуктор.

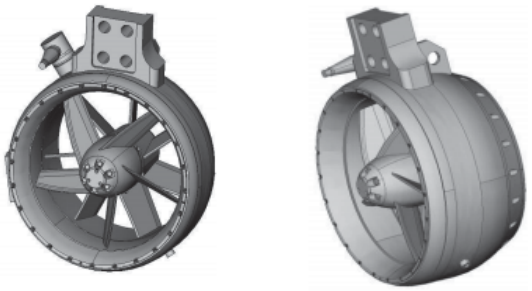


Рис. 3. Внешний вид ДДС КК

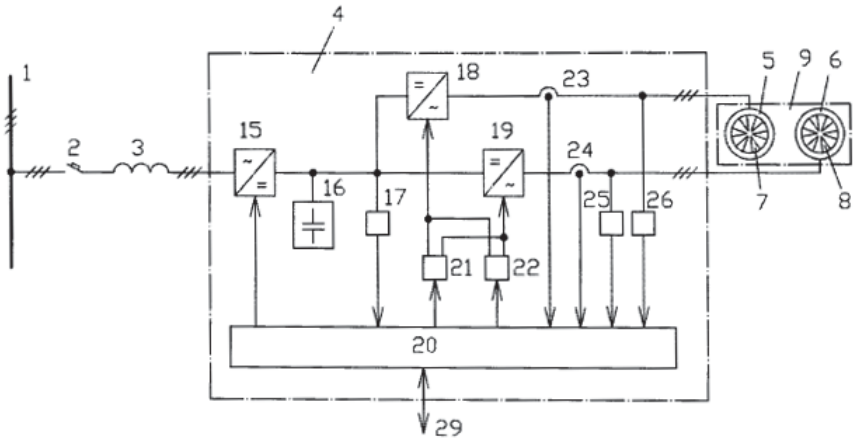


Рис. 4. Схема судовой системы электродвижения с двухвинтовым двигательно-движительным модулем на базе двигателей кольцевой конструкции

В качестве гребного электродвигателя (ГЭД), в отличие от традиционных СЭД, в ДДС КК применяется синхронная машина на постоянных магнитах. Использование синхронного ГЭД с возбуждением на постоянных магнитах повышает КПД и надежность, снижает массогабаритные показатели ДДС КК и виброакустические характеристики.

Применение ДДС КК в составе СЭД позволяет повысить КПД пропульсивного комплекса, уменьшить массогабаритные показатели, значительно снизить виброакустические характеристики. В настоящее время планируется использование системы электродвижения с двухвинтовым двигательно-движительным модулем на базе двигателей кольцевой конструкции. На рис. 4 представлена данная схема.

Создание и осуществление серийного производства СЭД нового поколения является актуальной задачей современной судостроительной отрасли.

Разрабатываемая СЭД на базе ДДС КК значительно превосходит зарубежные аналоги по ряду технико-экономических показателей и может использоваться на судах различного назначения [8]. Благодаря значительному снижению массогабаритных показателей ДДС КК целесообразно использовать в составе выдвижных ВРК вспомогательных СЭД и подруливающее устройство туннельного типа. СЭД с ДДС КК имеют более высокие технико-экономические показатели по сравнению с традиционными установками и могут применяться на современных судах различного назначения.

Из вышесказанного следует, что существует множество видов СЭД, имеющих достоинства широкой возможности дистанционного управления установкой, повышенного маневренного качества СЭД или возможности выбирать оптимальные параметры первичных двигателей и движителей. Но также на сегодняшний день СЭД имеет ряд недостатков. Все механические и электрические ВРК (винторулевые колонки) мощностью свыше 400–500 кВт в настоящее время закупаются за рубежом, отсюда возникают проблемы высокой стоимости и больших затрат на ремонт, необходимости разработки и изготовления подобного российского оборудования. В дальнейшем этого можно избежать, применив СЭД на базе ДДС КК с погружным электроприводом, благодаря которому повышается КПД и надежность, снижаются массогабаритные показатели и виброакустические характеристики ДДС КК.

Библиографический список

1. Коллектив авторов. История электротехники. 1999 г.

2. Движители кораблей и судов. 2010 [Электронный ресурс].

3. Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков, Г. М. Мирясов, В. Г. Титов и др. 2014.

4. *Калинин И. М.* Комплексная поставка судового развития теории и методов расчета режимов судовых единых электроэнергетических систем. 2014.

5. *Мацукович Е. В.* Электропривод винторулевой колонки. 2016.

6. Электрооборудования. Система электродвижения судна.

7. *Губанов Ю.* Электротехнические системы кораблей и судов: этапы развитии, автоматизации. Концепция электрического корабля. 2014.

8. *Григорьев А.* Судовая система электродвижения нового поколения // Морской флот. 2012.

УДК 62.50

А. В. Денисов
аспирант, младший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Р. Н. Яковлев
студент, программист
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО МАЯТНИКА

В статье рассматриваются методы обеспечения устойчивости перемещения антропоморфного робота, модель которого представлена в виде двухзвенного обратного маятника.

Произведен анализ методов балансировки при перемещении антропоморфных роботов для реализации на российском роботе Антарес, отличающемся наличием двухмоторного колена. Рассмотрены следующие методы: параллельный алгоритм метода сетевого оператора, метод естественных синергий, метод нечеткого управления.

Ключевые слова: *шагающие роботы, стабилизация, обратный маятник, антропоморфные роботы.*

A. V. Denisov
PhD Student, Junior Researcher
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS

R. N. Yakovlev
Student, Programmer
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS

BALANCE CONTROL METHODS BASED ON INVERTED PENDULUM FOR HUMANOID ROBOT'S WALKING

In the paper, we consider methods of balance control for anthropomorphic robot's walking, which model is presented as two-section inverted pendulum.

The balance control methods for anthropomorphic robot's walking are analyzed for implementation to Russian robot Antares, which unique in that it has two-motor knees. The analyzed balance methods are the parallel algorithm of the network operator method, method of natural synergies, method of fuzzy control.

Keywords: *legged robots, stabilization, control, inverted pendulum, anthropomorphic robots.*

Введение

Разработка шагающих роботов – это процесс, состоящий из множества задач, среди которых одной из важнейших является обеспечение устойчивости положения и перемещения шагающих роботов. Эта задача особенно важна при разработке антропоморфных роботов, имеющих только две точки опоры при перемещении в пространстве.

Целью данной работы является анализ методов обеспечения устойчивого положения и перемещения гуманоидных роботов в пространстве. На основе анализа будет предложен наиболее подходящий метод для последующего применения в разрабатываемом российском антропоморфном роботе Антарес. Робот Антарес уникален тем, что обладает двухмоторными коленями, что обеспечивает большие углы поворота двигателям, гибкость и пластичность узла ног по сравнению с аналогами [1]. Двухмоторное колено сильно усложняет кинематическую схему робототехнического средства, поэтому необходимо тщательно подобрать решения, обеспечивающие устойчивость положения данного робота [2].

Анализ методов обеспечения устойчивости шагающего робота

В работе [3] для решения задачи стабилизации двуногого шагающего робота на основе его инерционных свойств использовалась модель двухзвенного обратного маятника для представления робота. Идея управления таким маятником лежит в перераспределении момента импульса поступательного движения во вращательное движение и наоборот. Данный подход позволяет уменьшить момент со стороны опоры и управлять знаком и величиной момента силы тяжести. В качестве объекта управления авторы статьи рассматривают двухзвенный обратный маятник, представленный на рис. 1, оси шарниров которого параллельны и допускают движение маятника в вертикальной плоскости.

На рис. 1 l_1, l_2 – длина стержней, m_1, m_2 – масса стержней 1 и 2 соответственно. Масса каждого стержня распределена равномерно по всей длине. Управляющим воздействием является угол поворота стержня 1 относительно вертикали β.

Авторами статьи предложена формула математической модели объекта исследования:

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{K_\alpha(\alpha,\beta)}\Big[-K_\beta(\alpha,\beta)\ddot{\beta} + K_{ст\alpha}\alpha + K_{g\alpha}\sin(\alpha) + K_{g\beta}\sin(\beta) + M_{вз} + m_1\frac{l_1 l_2}{2}\left(\dot{\alpha}^2 - \dot{\beta}^2\right)\sin(\alpha-\beta)\Big],$$

где M – момент со стороны опорной поверхности; K – момент импульса; α, β – углы поворота; $K_{ст\alpha}$ – постоянный коэффициент стабилизации по углу α.

Авторы работы предполагают, что путем задания желаемого угла ($\beta_ж$) осуществляется кинематическое управление обратным маятником.

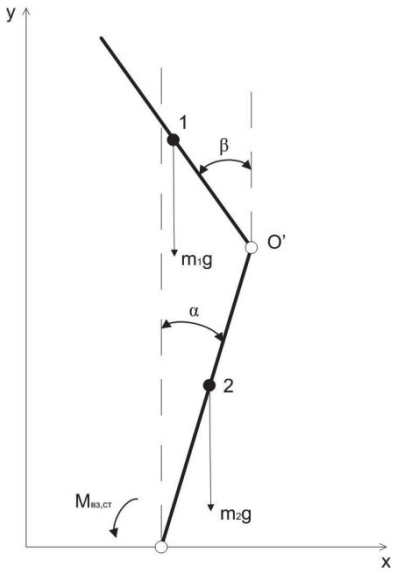


Рис. 1. Модель двухзвенного обратного маятника

$\beta_ж$ отличается от реального угла ($\beta_р$). Динамика исполнительного механизма, отрабатывающего угол β, описывается следующей формулой:

$$\ddot{\beta}_р = -\frac{2\varepsilon}{T}\dot{\beta}_р - \frac{1}{T^2}\beta_р + \frac{K}{T^2}\beta_ж.$$

Авторами статьи была построена модель маятника в пространстве состояний и проведен поиск управления в виде $u = g(x)$, которое удовлетворяет ограничениям $u^- \le u \le u^+$ и обеспечивает минимум функционалов.

$$J_1 = \sqrt{\sum_1^4 x_i^2(t_f)} + \sum_{i=1}^4 \int_0^t x_i^2(t_f) \to \min,$$

$$J_2 = t_f \to \min,$$

t_f – время управления $t_f = \begin{cases} t, \text{ если } x(t) \le \varepsilon \\ t^+, \text{ иначе} \end{cases}$,

где ε – малая положительная величина, t^+ – максимальное время процесса управления.

Для построения сетевого оператора авторы вводят четыре конечных упорядоченных множества: переменным $X = (x_1,..., x_р)$, параметров $Q = (q_1,..., q_R)$, унарных операций $O_1 = (p_1(z),..., p_w(z))$ и бинарных операций $O_2 = (x_0(z',z''), x(z',z''),..., x_{v-1}(z',z''))$.

Сетевой оператор представляет собой ориентированный граф, который описывает математические выражения. Любому узлу соответствуют элементы из множеств параметров Q или переменных X; любому узлу, не являющемуся источником, соответствует бинарная операция из множества O_2; любой дуге графа соответствует унарная операция из множества O_1.

В работе была использована матрица сетевого оператора, построенная по матрице смежности графа сетевого оператора для представления сетевого оператора в памяти компьютера. В матрице сетевого оператора недиагональные ненулевые элементы указывают номера унарных операций, а диагональные элементы – номера бинарных операций [4]. Для вычислений результата математического выражения по матрице сетевого оператора были введены векторы номеров узлов входных переменных. Поиск матрицы сетевого оператора был произведен с помощью генетического алгоритма.

Был проведен численный эксперимент, в результате которого были получены вектор параметров и матрица сетевого оператора, которая соответствует следующему закону управления:

$$y = -x_1q_1 - x_2q_2 + x_3q_3 + x_4q_4.$$

В результате применения параллельного алгоритма для синтеза системы стабилизации двуногого шагающего робота методом сетевого оператора был получен нелинейный закон управле-

ния по координатам состояния, который удовлетворяет заданному качеству.

В работе [5] рассматривается возможность управления движением двухзвенного антропоморфного робота на основе координации естественных синергий. Авторы работы исследуют подход, демонстрирующий преимущества моторного контроля, который основан на управлении собственными движениями, что и является естественными синергиями. Движения происходят вдоль собственных векторов динамического уравнения механической системы, они являются комбинациями суставных углов и моментов, что является преимуществом, так как значительно упрощает разработку.

Для анализа динамики робота рассматривается его модель в виде двухзвенного обратного маятника, где верхнее звено представляет корпус, голову и руки, а нижнее – ноги [6]. В численных расчетах использовались следующие параметры антропоморфного робота: вес – 70 кг, рост – 170 см.

Авторы рассматривают управление движением робота в терминах естественных синергий. С помощью линейного приближения возможно разложить движение на составляющие, направленные вдоль двух собственных векторов, что позволяет вывести два скалярных уравнения, описывающих движение однозвенного обратного маятника, управляемого своим ПД-контроллером.

$$\lambda_i \ddot{\xi}_i(t) = \eta_i^{con}(t), i = A, H,$$

$$\eta_i^{con}(t) = \eta_i^{con}(t-\tau) + S_i^{eig} \times$$
$$\times\left(\xi_i^{des}(t) - \xi_i(t-\tau)\right) - V_i^{eig}\dot{\xi}_i(t-\tau) - \lambda_i\ddot{\xi}_i(t-\tau).$$

В случае однозвенного перевернутого маятника $\lambda = J/mgh$, $\eta = T/mgh$, $S_i^{eig} = S/mgh$, $V_i^{eig} = V/mgh$, где J – момент инерции маятника относительно оси вращения; m – его масса; h – высота положения центра масс над осью вращения; g – ускорение свободного падения; T – суммарный момент сил (кроме гравитационных) относительно оси вращения; S и V – параметры ПД-контроллера.

В работе были получены матрицы жесткости и вязкости в терминах суставных углов. Полученные матрицы являются симметричными, но не диагональными. Таким образом, авторы делают вывод, что управление суставными углами зависит не только от текущих значений данного угла, но и от углов во всех других суставах, что определяет реализацию ПД-контроллера, при которой коррекция по каждой степени свободы определяется значениями координат и их производных для всех степеней свободы.

Авторами статьи был проведен анализ устойчивости управления и эксперимент по устойчивости на роботе PostuRob II, параметры которого близки к человеческим. PostuRob II состоит из корпуса и двух ног. Соединение элементов конструкции робота осуществляется посредством тазобедренных и голеностопных суставов [7]. Во время эксперимента сигналы от мехатронных датчиков суставных углов поступали на компьютер в режиме реального времени.

Независимость ПД-контроллера каждой из естественных синергий позволила проанализировать устойчивость всей модели целиком благодаря отдельному анализу устойчивости движения каждой из этих синергий.

Произведен расчет и протестированы на работе параметры ПД-контроллера. Выбранные параметры обеспечивают устойчивость движений и для робота, и для модели. Таким образом, движения нижнего сегмента, как и требовалось, компенсировали перемещения центра тяжести, связанные с движениями верхнего сегмента.

Главным результатом исследования является подтверждение устойчивого управления на реальном роботе по принципу независимого управления каждой из естественных синергий с параметрами петли обратной связи в ходе реального эксперимента.

В работе [8] рассматривается метод преодоления «рассогласования» теории адаптивного и робастного управления с практикой ее применения, основанный на переходе к многоальтернативным системам.

Идеи многоальтернативности имеют ярко выраженные биологические аналогии, определенные в виде закона необходимого разнообразия У. Эшби [9], и, в частности, хорошо соответствуют содержанию предложенных Л. Заде процедур нечеткого управления [10].

В качестве типового представителя структурно неустойчивых объектов авторы работы рассматривают модель обратного маятника, установленного на опору, горизонтально перемещаемую с некоторым трением под действием внешней управляющей силы.

Авторы описывают движение рассматриваемого объекта следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} (m_1+m_2)\ddot{x} - m_2 L\left(\ddot{\alpha}\cos\alpha - \dot{\alpha}^2\sin\alpha\right) = F - F_{\text{тр}}, \\ F_{\text{тр}} = \mu\left[m_1 g + m_2\cos\alpha\left(g\cdot\cos\alpha - \ddot{x}\sin\alpha - \dot{\alpha}^2 L\right)\text{sign}(\dot{x})\right], \\ -\ddot{x}\cos\alpha + L\ddot{\alpha} - g\sin\alpha = 0, \end{cases}$$

где m_1, m_2 – массы опоры и сосредоточенная масса маятника соответственно, кг; L – длина маятника, м; x – координата, характеризующая горизонтальное положение опоры маятника, α – угол отклонения мятника от вертикали, рад; g – ускорение свободного падения, м/с^2; ω – угловая скорость, рад/с; μ – коэффициент сухого трения опоры; $F_{\text{тр}}$ – сила сухого трения, Н; F – внешняя сила, приложенная к подвижной опоре, Н.

Для стабилизации положения обратного маятника авторы работы использовали структуру системы с регулятором, на котором на вход поступает информация о состоянии объекта, а на выход – сигнал, преобразуемый в управляющее воздействие на объект.

Для синтеза структуры нечеткого регулятора авторы работы строят перечень лингвистических и нечетких входных и выходных переменных регулятора, формируют функции принадлежности для указанных переменных, строят решающие правила нечеткого логического вывода, определяющие в своей совокупности управление объектом.

Многокритериальность является основной особенностью построения алгоритма управления. Многокритериальность – это управление одним воздействием двумя координатами объекта, угловым отклонением α маятника и положением x его опоры. Таким образом, была использована идея разделения регулирования движений: как только угол и скорость достигают малых значений z_1^2 и z_2^2, осуществляется переход к регулированию по состоянию опоры.

При этом регулирование по углу или скорости становится приоритетным, если α или $\dot{\alpha}$ выходят из малого диапазона. В результате применения такого подхода было получено десять нечетких решающих правил. Данные правила формируют очевидные по знаку и модулю величины управления, приводящие координаты маятника в заданное состояние, осуществляют принудительное угловое отклонение маятника в сторону требуемого движения опоры, приводят опору в заданное положение x_0, формируют результирующее управляющее воздействие, соответствующее текущему состоянию объекта.

Из вычисленных правил получается результирующее нечеткое множество:

$$\mu_u^*(y) = \sum_{j=1}^{10} \mu_{u^j}^*(y).$$

Проверка стабилизирующих и робастных свойств синтезированной системы проводилась на построенной выше модели обратного маятника с параметрами: $m_1 = 100$ кг, $m_2 = 20...200$ кг, $L = 5$ м, $g = 9{,}81$ м/с^2, $\mu = 0{,}05$, среди которых масса m_2 изменялась в десять раз. Начальное угловое положение маятника $\alpha(0) = 0{,}2$ рад, положение опоры $x(0) = 0$.

Стабилизация осуществляется путем соответствующих перемещений опоры. Время возвращения опоры в исходное положение после завершения процесса угловой стабилизации составляет в обоих случаях 35 с.

Полученные результаты подтверждают эффективность нечеткого регулирования посредством использования многоальтернативных систем в задачах управления объектами в критических режимах.

Заключение

В данной статье рассмотрены три разных метода обеспечения устойчивости шагающих роботов. Произведен обзор следующих методов балансировки антропоморфных роботов: параллельный алгоритм метода сетевого оператора; метод естественных синергий; метод нечеткого управления. Во всех методах модель робота была представлена в виде двухзвенного обратного маятника, что соответствует неустойчивому положению робота в пространстве. Все методы были протестированы на модели и показали свою работоспособность. Метод, описанный в работе [5], был протестирован на реальном роботе, а по результатам тестирования продемонстрировал лучшие показатели стабилизации шагающего робота, но данный подход очень трудоемок и требует больших вычислительных мощностей, что не позволяет использовать его во встраиваемых аппаратных решениях, в том числе и в антропоморфном роботе Антарес. Таким образом, в дальнейшей разработке гуманоидного робота Антарес будет использоваться метод обеспечения устойчивости, описанный в работе [3], который показал второй лучший результат стабилизации. Его преимуществами являются скорость работы, относительная простота алгоритма, возможность управления величиной момента силы тяжести и уменьшения момента со стороны опоры. Дальнейшие разработки будут направлены на интеграцию программных решений данного метода в робототехническое ядро [11] робота Антарес.

Библиографический список

1. *Павлюк Н. А., Ронжин А. Л.* Конструктивные решения нижних конечностей для антропоморфного робота Антарес // Экстремальная робототехника. 2016. С. 422–427.

2. Mechanical Leg Design of the Anthropomorphic Robot Antares Interactive Collaborative Robotics / N. Pavluk, A. Ivin, V. Budkov etc. // First International Conference ICR 2016. Budapest, Hungary, 2016. P. 113–123.

3. *Кулаков Б. Б., Жаркова А. С., Казарян Д. Э.* Параллельный алгоритм метода сетевого оператора в задаче многокритериального синтеза системы стабилизации двуногого шагающего робота // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2010. № 4. С. 26–36.

4. Convex Shape Generation by Robotic Swarm / I. Vatamaniuk, G. Panina, A. Saveliev, A. Ronzhin // IEEE 2016 International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions. 2016. P. 306–310.

5. Устойчивое управление позой и движениями стоящего гуманоида по принципу естественных синергий у человека / Александров А. В.,

Мергнер Т., Фролов А. А. и др. // Российский журнал биомеханики. 2013. Т. 17. № 1 (59). С. 94–109.

6. *Ronzhin A., Vatamaniuk I., Pavliuk N.* Automatic Control of Robotic Swarm during Convex Shape Generation // 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. Romania, Iasi, 2016. Index 926.

7. *Assländer L., Hettich G., Mergner T.* Visual contribution to Human Standing Balance During Support Surface Tilts // Human Movement Science. 2015. № 41. С. 147–164.

8. *Васильев Е. М., Прокофьева Д. М.* Нечеткое управление структурно неустойчивыми объектами // Вестник воронежского госуд. техн. ун-та. 2012. Т. 8. № 10 (1). С. 8–12.

9. *Эшби У. Р.* Введение в кибернетику. М.: Изд. иностр. лит., 1959. 432 с.

10. *Заде Л. А.* Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. М.: Знание, 1974. С. 64.

11. *Ivin A., Mikhalchenko D.* Software Platform for Development of Multimodular Robotic Systems with Asynchronous Multithreaded Control // 21st Fruct Conference, 2017.

УДК 621

П. А. Смирнов
студент СПбГУАП
младший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук

М. Ю. Кузов
студент СПбГУАП
младший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук

Н. А. Павлюк
ассистент СПбГУАП, младший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук,

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАНИПУЛЯТОРА С ИЗМЕНЯЕМОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

В данной работе описан процесс разработки модульного реконфигурируемого манипулятора, конструкция узлов которого позволяет с минимумом ограничений изменять кинематическую цепь и задачи применения. Описаны отдельные компьютерные модели модулей манипулятора, рассмотрены способы реализации требуемого функционала на примере существующих решений.

Ключевые слова: *манипулятор, модуль, реконфигурация, кинематическая цепь.*

P. A. Smirnov
Student (SUAI)
Junior Researcher (SPIIRAS)

M. Yu. Kuzov
Assistant (SUAI)
Junior Researcher (SPIIRAS)

N. A. Pavliuk
PhD Student (SUAI), Junior Researcher (SPIIRAS)

DEVELOPMENT OF THE MODEL OF A MANIPULATOR WITH A CHANGEABLE KINEMATIC CHAIN

The process of developing of the modular reconfigurable manipulator is described in this paper. Its design allows minimizing the limitations of the kinematic circuit and application problems. Invididual computer models of the manipulator modules are described, methods of implementing of the required functional are considered, using the example of existing solutions.

Keywords: *manipulator, module, reconfiguration, kinematic chain.*

В современных промышленности, армии, коммунальных и экстренных службах манипулятор является одним из наиболее часто используемых устройств для выполнения широкого диапазона задач, упрощения их выполнения, обеспечения более высокого качества выполняе-

мых работ по сравнению с ручным трудом. Постепенно эти механизмы для управления пространственным положением орудий и объектов входят в повседневную жизнь, что ведет к развитию данного класса механизмов и появлению большого разнообразия конструктивно и функционально разных устройств, создаваемых для условий более узконаправленной работы.

Описанный в данной работе манипулятор разрабатывается с целью упростить и сократить время подготовки устройства к работе, унифицировать интерфейс подключения узлов и расширить круг задач, выполняемых одним устройством. Конструкция манипулятора предполагает взаимную независимость модулей элемента защиты подвижных частей редуктора электропривода и уменьшение размеров мехатронного модуля относительно аналогичных по техническим требованиям конструкций. Модули плеч манипулятора с одинаковыми по характеристикам электроприводами и отличающимися функциональными возможностями позволяют осуществлять перемещение модулей манипулятора в кинематической цепи без дополнительных доработок устройства.

Кинематическая пара (англ. *kinematic pair*) – это соединение двух звеньев, обеспечивающее определенное относительное движение. Для всех кинематических пар необходим постоянный контакт между их элементами, это достигается либо с помощью определенных усилий, либо приданием элементам определенной геометрической формы.

Классификация:

1. По числу связей на относительное движение:

– от одной до пяти связей. Это связано со степенями свободы, которых для материального тела всего шесть; исключая (связывая) по одной, мы получаем пять вариантов связей.

2. По контакту между звеньями:

– высшие (контакт по точке или линии);

– низшие (контакт по поверхности).

В данной работе описывается создание модулей манипулятора, имеющих разные функциональные возможности, позволяющие осуществлять перемещение тела манипулятора в пространстве. Для расчетов исполнительных механизмов модулей были выбраны компактные сервоприводы, применяемые в прототипировании и построении различных робототехнических систем развлекательного характера [1, 2]. Основные характеристики сервоприводов, сыгравшие роль в выборе основного механизма приведения в движение узлов манипулятора, приведены в табл. 1.

Базовые модули манипулятора отличаются назначением, конструкцией и принципами работы. Компьютерные модели этих модулей и их описание представлены на рис. 1–4.

Таблица 1

Характеристики сервоприводов

	SBRS-5314HTG	SRS-3216HTG	TGY-901D
Питание, В	7,4~11,1	6,0~7,4	6–7,2
Скорость, сек/60°	0,18~0,14	0,18~0,16	0,16
Момент, кг/см	32,4~53,1	25,8~32,4	12,5
Вес, г	83	73	58
Диапазон поворота, °	0~280, 360	0~280, 360	0~180

Рис. 1. Модуль плеча A

Рис. 2. Модуль плеча B

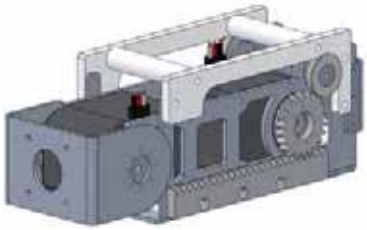


Рис. 3. Модуль плеча C

Рис. 4. Модуль G

Модуль плеча A (рис. 1). На нижнем торце контактные площадки для интерфейсов управления и питания, механизм углового перемещения в диапазоне до 180°. На верхнем торце контактные площадки для интерфейсов управления и питания.

Модуль плеча B (рис. 2). На нижнем торце механизм углового перемещения в диапазоне до 180° и контактные площадки для интерфейсов управления и питания. На верхнем торце ме-

ханизм осевого вращения в диапазоне до 180° и контактные площадки для интерфейсов управления и питания.

Модуль плеча C (рис. 3). На нижнем торце механизм углового перемещения в диапазоне до 180° и контактные площадки для интерфейсов управления и питания. Плечо телескопическое, с возможностью увеличения длины на 35–50%. На верхнем торце контактные площадки для интерфейсов управления и питания.

Модуль G (рис. 4) – базовый модуль кисти манипулятора, осуществляющий захват и удержание объекта и угловое перемещение в пределах от 0 до 90°. Как видно из табл. 2, приводящей сведения о характеристиках модулей манипулятора, модули A и B имеют самый простой функционал и наиболее мощные сервоприводы, малый вес и простую конструкцию. Модуль C находится на этапе раннего прототипа для поиска наиболее оптимального механизма удлинения, позволяющего сохранить жесткость конструкции. Модуль G является функциональным модулем манипулятора, выполнен как классическое устройство захвата и при необходимости может заменяться на другие модули, предоставляющие различный функционал для работы с объектами.

На данный момент разработана основная конструкция, на основе которой разрабатывается

Рис. 5. Общий вид манипулятора

Таблица 2

Характеристики модулей манипулятора

	Модуль A	Модуль B	Модуль C	Модуль G
Вес, г	105	196	270	220
Длина, мм	140	140	146 (206)	76–176
Кол-во степеней свободы, шт.	1	2	2	2
Мощность двигателей, кг/см	32,4–53,1	32,4–53,1 25,8–32,4	25,8–32,4	12,5
Питание, В	7,4–11,1	7,4–11,1	6,0–7,4	6–7,2

система управления манипулятором при сборке в стандартной кинематической цепи [3]. На основе компьютерной модели изготовлен прототип, используемый для настройки и отработки системы управления. Также на данный момент разрабатывается модуль базы манипулятора, необходимый для осевого вращения манипулятора. Этот модуль необходим в случае конфигурации кинематической цепи из модулей одного типа для сохранения подвижности и гибкости манипулятора в целом. Возможно использование и RHS (ROBOTIC HALTERUNGS-SYSTEME) [4] – систем крепления для роботов и прочих подвижных манипуляторов. Назначение для автоматизации обеспечивает в конкретном варианте применения множество преимуществ:

– очень высокую прочность системы;

– компактную конструкцию;

– простоту монтажа вкладышей и шланга для защиты кабеля без дополнительных инструментов;

– небольшой собственный вес;

– сокращение расходов: для каждого случая применения требуется только одна опорная система.

Представленная базовая модель манипулятора (рис. 5) построена в программном комплексе SolidWorks. Для обеспечения модульности разрабатывается специальное унифицированное крепление, подходящее для размещения в одном месте интерфейсов питания, управления и передачи данных. Данное крепление будет располагаться на торцах модулей и служить для соединения модулей в единую цепь с последующей идентификацией модулей по типу (тип определяет функциональное назначение) в системе управления манипулятором. В конструкции универсального крепления модулей возможно использование неодимовых магнитов. Неодимовый магнит – постоянный мощный редкоземельный магнит, состоящий из сплава неодима, бора и железа. Известен своей мощностью притяжения и высокой стойкостью к размагничиванию. Имеет металлический внешний вид, очень востребован и применяется в разных областях промышленности, медицины, в быту и электронике [5]. Конструкция модулей рассчитана на быструю замену или перестановку в кинематической модели в зависимости от задач, которые должен решать манипулятор.

В процессе разработки применяются наработки, полученные в ходе проектирования антропоморфного робота Антарес [1, 2]. Разрабатываемый манипулятор прежде всего ориентирован на применение в образовательных целях для участия в соревнованиях социальных роботов, а также при разработке ассистивных технологий человеко-машинного взаимодействия на основе многомодальных интерфейсов. Таким образом, в данной статье рассмотрены и продемонстрирова-

ны разработки по проектированию манипулятора с изменяемой кинематической цепью. Манипуляторы подобного типа могут использоваться в гораздо более широкой сфере применения в отличие от манипуляторов, имеющих неизменную и однажды собранную кинематическую цепь, так как не ограничены по сути одной конкретной задачей и могут изменяться по желанию пользователя.

Однако одним из важнейших и сложнейших моментов в разработке подобных манипуляторов является не только разработка конструкции отдельных модулей и интерфейса сопряжения, но также системы управления подобными устройствами, поскольку существующие готовые решения в большинстве случаев окажутся не способны работать с таким манипулятором без значительных доработок или же должны быть разработаны с нуля [3, 6].

Представленное в работе устройство в дальнейшем будет использоваться в научных и исследовательских целях по разработке и отработке сценариев работы механизмов для управления пространственным положением орудий и объектов, имеющих в кинематической схеме 6 и более степеней свободы и позволяющих их перестановку относительно друг друга.

Библиографический список

1. *Гапонов В. С., Дашевский В. П., Бизин М. М.* Модернизация программно-аппаратного обеспечения модельных сервоприводов для использования в антропоморфных робототехнических комплексах // Доклады ТУСУР, 2016. Т. 19. № 2. С. 41–50.

2. *Павлюк Н. А., Будков В. Ю., Бизин М. М., Ронжин А. Л.* Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота Антарес на основе двухмоторного колена // Известия ЮФУ. Технические науки, 2016. № 1 (174). С. 227–239.

3. Системы управления манипуляционных роботов / В. С. Медведев, А. Г. Лесков, А. С. Ющенко и др. М.: Наука, 1978. 416 с.

4. RHS – системы крепления роботов (ROBOTIC HALTERUNGS-SYSTEME) [Электронный ресурс]. URL: http://yustaltd.ru/news/rhs-sistemyi-krepleniya-robotov-robotic-halterungs-systeme/ [дата обр.: 21.03.2017].

5. *Спеддинг Ф. Х., Даан А. Х.* Редкоземельные металлы. Металлургия, 1965.

6. *Корецкий А. В., Созинова Е. Л.* Обратная задача кинематики и прямая задача динамики о вертикальном подъеме груза четырехзвенным манипулятором / под ред. М. Н. Кирсанова. М.: ИНФРА-М, 2015. Т. 1. 20 с.

УДК 004.75; 620.91

С. В. Соленый[1]
кандидат технических наук, доцент

В. Ф. Шишлаков[2]
доктор технических наук, профессор

О. Я. Соленая[3]
кандидат технических наук, доцент

Н. В. Артикульный[4]***, Д. Г. Шавлиашвили***[5]***, Л. М. Ильин***[6]
студенты факультета СПО
[1,2.3,4,5,6]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В работе рассмотрен подход повышения энергоэффективности и безопасности эксплуатации солнечных батарей путем применения киберфизической системы, которая позволяет проводить очистку и диагностику поверхности солнечной батареи. Раскрыты особенности конструкции, компоновки и монтажа робота-очистителя на поверхности солнечной батареи. Также приведена принципиальная схема всей системы и алгоритм ее функционирования.

Ключевые слова: *киберфизическая система, возобновляемые источники энергии, солнечная батарея, робототехника, климатические условия.*

S. V. Solyonyj[1]
PhD, Tech., Associate Professor

V. F. Shishlakov[2]
Dr. Sc., Tech., Professor

O. Ya. Solenaya[3]
PhD, Tech., Associate Professor

N. V. Articulniy[4]***, D. G. Shavliashvili***[5]***, L. M. Ilin***[6]
Students of the Faculty of SVE
[1,2.3,4,5,6]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

CYBERPHYSICAL SYSTEMS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

The paper considers the approach to improve energy efficiency and safety of solar batteries, by using a cyberphysical system that allows for cleaning and diagnostics of the solar cell surface. The features of the construction, arrangement and installation of the robot cleaner on the surface of the solar battery are disclosed. Also shown is a schematic diagram of the entire system and an algorithm for its operation.

Keywords: *cyberphysical system, renewable energy sources, solar battery, robotics, climatic conditions, cleaning.*

Развитие возобновляемых источников энергии бесспорно является передовым и перспективным направлением экологически чистой электроэнергетики [1, 2]. Использование солнечной и ветроэнергетики, безусловно, занимает одно из первых мест по скорости развития современных технологий [3, 4].

В работе [5] рассматривался подход, который позволяет повысить эффективность солнечной батареи путем внедрения системы автоматического управления, отслеживающей положение солнца, таким образом вырастет общий КПД энергосистемы. Данный подход весьма интересен, однако он не позволяет охватить полный

комплекс задач, которые связаны с повышением энергоэффективности и надежности солнечных электростанций. Таким образом, необходимо внедрять в электроэнергетику современные киберфизические системы, которые позволят проводить комплексную диагностику, мониторинг, защиту, настройку под требования потребителя и окружающей среды, а если потребуется – и ремонт электрооборудования. Также данная система должна обладать функцией передачи и накопления данных в облаке для проведения последующего анализа и прогнозирования [6, 7].

Солнечные батареи могут эксплуатироваться в различных климатических зонах, что, несомненно, влияет на степень их загрязненности, степень которой зависит как от интенсивности природных факторов (дождь, снег, пыль и др.), так и человеческих (отходы жизнедеятельности, грязное производство и др.). Одним из факторов, позволяющих повысить эффективность солнечной батареи, является своевременная очистка ее поверхности, а также непосредственный визуальный контроль на предмет повреждений.

В данной работе рассмотрена разработка и создание киберфизической системы, которая позволяет проводить очистку и мониторинг состояния солнечной батареи. Киберфизическая система смонтирована на базе солнечной батареи NP65GK, которая входит в состав электроэнергетического комплекса открытой архитектуры [1], разработанного Институтом инновационных технологий в электромеханике и робототехнике ГУАП. Солнечная батарея NP65GK имеет выходную мощность 65 Вт при токе нагрузки 3,74 А и

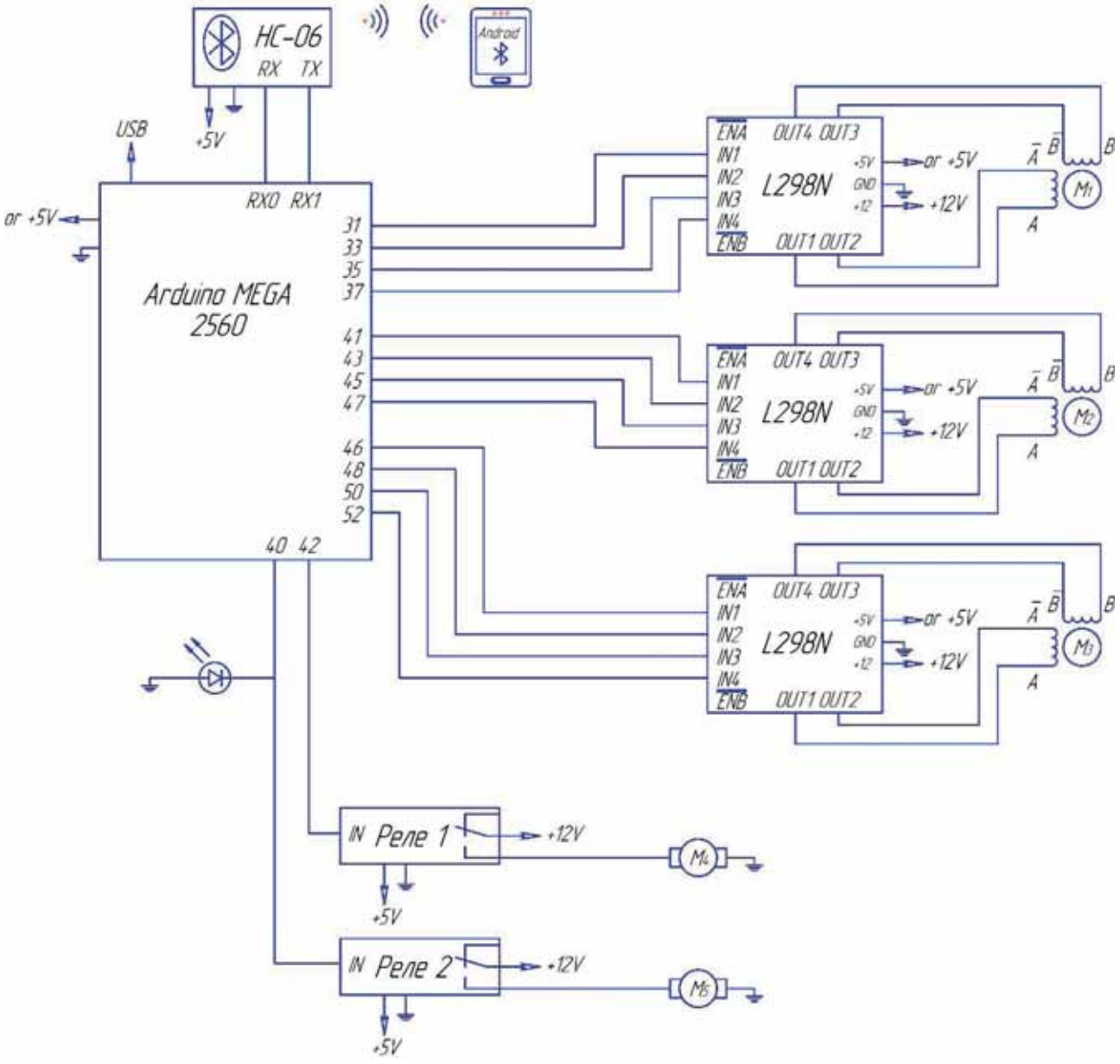


Рис. 1. Принципиальная схема киберфизической системы для очистки солнечной батареи

напряжении 17,4 В, а также следующие габаритные размеры: длина 775 мм, ширина 670 мм, толщина по краю 34 мм, вес 6,0 кг [5].

Анализ типов солнечных батарей, их массогабаритных показателей и способов компоновки показал, что для группы солнечных батарей, выстроенных в ряд, лучше применять сплошную систему очистки с поочередным перемещением робота-очистителя по всем батареям. Для отдельно стоящей солнечной батареи лучше применять локальную систему очистки с точечным позиционированием робота-очистителя на поверхности батареи. В нашем случае был выбран второй подход для построения киберфизической системы. Ее принципиальная схема представлена на рис. 1. Аппаратная часть системы строится на базе микроконтроллера Arduino Mega 2560. В качестве канала передачи информации с сенсоров и сигналов управления применена технология Bluetooth на базе модуля HC-06 и мобильного устройства с операционной системой Android. Система позиционирования робота-очистителя построена на базе трех драйверов электродвигателей L298N и трех биполярных шаговых двигателей 17HS3001-2B (применяется ременная передача крутящего момента (рис. 2, *а*)). Система очистки запускается при помощи электромеханических реле SRD-05VDC-SL-C, которые, в свою очередь, запускают вентиляторы DP-FLED-WB80, лопасти которых оснащены специальными щетками (рис. 2, *б*).

Киберфизическая система очистки солнечной батареи предполагает два варианта алгоритмов функционирования:

1. Автономное управление. Робот-очиститель запускается автоматически через заданные промежутки времени, зависящие от климатических условий, в которых эксплуатируется солнечная батарея, и проводит сканирование. При обнаружении с помощью сенсоров (камер, инфракрасных датчиков, датчиков влаги и др.) загрязнения робот-очиститель запускается и проводит очистку, также данные, полученные с сенсоров, передаются в облако для последующего анализа и прогнозирования поведения смежных систем.

2. Дистанционное управление. Робот-очиститель запускается оператором в соответствии с журналом проведения технического осмотра оборудования, который составляется с учетом климатических условий, и проводит ручное сканирование поверхности батареи. При обнаружении с помощью сенсоров загрязнения он в ручном режиме запускает робот-очиститель.

а)

б)

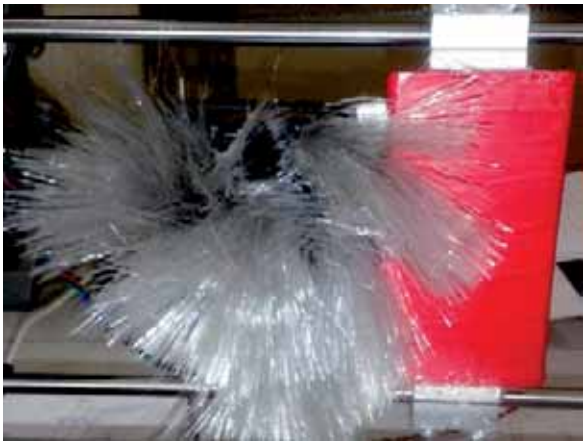


Рис. 2. Ременная передача крутящего момента биполярных шаговых двигателей 17HS3001-2B (а) и система очистки на базе вентиляторов DP-FLED-WB80, лопасти которых оснащены специальными щетками (б)

Рис. 3. Приложение BT Controller (виртуальный джойстик-манипулятор) для Android

Рассмотрим дистанционное управление киберфизической системой очистки солнечной батареи. Для управления всей системой было выбрано приложение BT Controller (виртуальный джойстик-манипулятор) для Android, которое использует библиотеку BTCA2A.h для Arduino [9]. Такой подход позволяет использовать смартфон или планшет в качестве Bluetooth-контроллера (рис. 3), а также при необходимости использовать FPV-камеру, подключаемую по Wi-Fi.

Алгоритм функционирования при дистанционном управлении системой очистки представлен в виде программного кода, разработанного на языке, основанном на C/C++, в программном обеспечении Arduino IDE:

```
#include <BTCA2A.h> // подключение библиотеки
BTCA2A.h для Arduino
btca2a btca2a; // переменные, передаваемые
приложением BT Controller при нажатии кнопок
виртуального джойстика-манипулятора
int input1 = 31; // номера ножек для подключения
драйвера электродвигателя L298N, который
управляет правым биполярным шаговым двигателем
17HS3001-2B, предназначенным для передвижения
робота-очистителя вверх или вниз
int input2 = 33; int input3 = 35; int input4 = 37;
int input11 = 41; // номера ножек для подключения
драйвера электродвигателя L298N, который
управляет левым биполярным шаговым двигателем
17HS3001-2B, предназначенным для передвижения
робота-очистителя вверх или вниз
int input21 = 43; int input31 = 45; int input41 =
47;
int input12 = 46; // номера ножек для подключения
драйвера электродвигателя L298N, который
управляет центральным биполярным шаговым
двигателем 17HS3001-2B, предназначенным для
передвижения робота-очистителя вправо или влево
int input22 = 48; int input32 = 50; int input42 =
52;
int fan = 42; // номера ножек для подключения
электромеханических реле SRD-05VDC-SL-C,
предназначенных для запуска вентиляторов DP-FLED-
WB80
int fan1 = 40;
int speed1 = 1; // скорость вращения биполярных
шаговых двигателей 17HS3001-2B
void setup() { // начальные установки
btca2a.SetupHardwareSerial(0, 9600); // активация
канала передачи сигналов управления по Bluetooth-
каналу с заданной скоростью
pinMode(input1,OUTPUT); // настройка выходов
pinMode(input2,OUTPUT); pinMode(input3,OUTPUT);
pinMode(input4,OUTPUT);
pinMode(input11,OUTPUT); pinMode(input21,OUTPUT);
pinMode(input31,OUTPUT); pinMode(input41,OUTPUT);
pinMode(input12,OUTPUT); pinMode(input22,OUTPUT);
pinMode(input32,OUTPUT); pinMode(input42,OUTPUT);
pinMode(fan, OUTPUT);
}
void loop() { // цикл
btca2a.ReadCommand(); // ожидание значения
переменной btca2a, передаваемой по Bluetooth-
каналу
if (btca2a.ButtonPressed(KEYCODE_BUTTON_B)){ //
движение робота-очистителя вверх
digitalWrite(input1,HIGH); digitalWrite(input2,LOW);
digitalWrite(input3,LOW);
digitalWrite(input4,HIGH);
digitalWrite(input11,HIGH);
digitalWrite(input21,LOW);
digitalWrite(input31,LOW);
digitalWrite(input41,HIGH);
delay(speed1); // задержка
digitalWrite(input1,LOW); digitalWrite(input2,HIGH);
digitalWrite(input3,LOW);
digitalWrite(input4,HIGH);
digitalWrite(input11,LOW);
digitalWrite(input21,HIGH);
digitalWrite(input31,LOW);
digitalWrite(input41,HIGH); delay(speed1);
digitalWrite(input1,LOW); digitalWrite(input2,HIGH);
digitalWrite(input3,HIGH);
digitalWrite(input4,LOW); digitalWrite(input11,LOW);
digitalWrite(input21,HIGH);
digitalWrite(input31,HIGH);
digitalWrite(input41,LOW); delay(speed1);
digitalWrite(input1,HIGH); digitalWrite(input2,LOW);
digitalWrite(input3,HIGH);
digitalWrite(input4,LOW);
digitalWrite(input11,HIGH);
digitalWrite(input21,LOW);
digitalWrite(input31,HIGH);
digitalWrite(input41,LOW); delay(speed1);
} else
if (btca2a.ButtonPressed(KEYCODE_BUTTON_X)){ //
движение робота-очистителя вниз
digitalWrite(input1,LOW); digitalWrite(input2,HIGH);
digitalWrite(input3,LOW);
digitalWrite(input4,HIGH);
digitalWrite(input11,LOW);
digitalWrite(input21,HIGH);
digitalWrite(input31,LOW);
digitalWrite(input41,HIGH); delay(speed1);
digitalWrite(input1,HIGH); digitalWrite(input2,LOW);
digitalWrite(input3,LOW);
digitalWrite(input4,HIGH);
digitalWrite(input11,HIGH);
digitalWrite(input21,LOW);
digitalWrite(input31,LOW);
digitalWrite(input41,HIGH); delay(speed1);
digitalWrite(input1,HIGH); digitalWrite(input2,LOW);
digitalWrite(input3,HIGH);
digitalWrite(input4,LOW);
digitalWrite(input11,HIGH);
digitalWrite(input21,LOW);
digitalWrite(input31,HIGH);
digitalWrite(input41,LOW); delay(speed1);
digitalWrite(input1,LOW); digitalWrite(input2,HIGH);
```

```
digitalWrite(input3,HIGH);
digitalWrite(input4,LOW); digitalWrite(input11,LOW);
digitalWrite(input21,HIGH);
digitalWrite(input31,HIGH);
digitalWrite(input41,LOW); delay(speed1);
} else
if (btca2a.ButtonPressed(KEYCODE_BUTTON_A)){ //
движение робота-очистителя вправо
digitalWrite(input12,HIGH);
digitalWrite(input22,LOW);
digitalWrite(input32,LOW);
digitalWrite(input42,HIGH); delay(speed1);
digitalWrite(input12,LOW);
digitalWrite(input22,HIGH);
digitalWrite(input32,LOW);
digitalWrite(input42,HIGH); delay(speed1);
digitalWrite(input12,LOW);
digitalWrite(input22,HIGH);
digitalWrite(input32,HIGH);
digitalWrite(input42,LOW); delay(speed1);
digitalWrite(input12,HIGH);
digitalWrite(input22,LOW);
digitalWrite(input32,HIGH);
digitalWrite(input42,LOW); delay(speed1);
} else
if (btca2a.ButtonPressed(KEYCODE_BUTTON_Y)){ //
движение робота-очистителя влево
digitalWrite(input12,LOW);
digitalWrite(input22,HIGH);
digitalWrite(input32,LOW);
digitalWrite(input42,HIGH); delay(speed1);
digitalWrite(input12,HIGH);
digitalWrite(input22,LOW);
digitalWrite(input32,LOW);
digitalWrite(input42,HIGH); delay(speed1);
digitalWrite(input12,HIGH);
digitalWrite(input22,LOW);
digitalWrite(input32,HIGH);
digitalWrite(input42,LOW); delay(speed1);
digitalWrite(input12,LOW);
digitalWrite(input22,HIGH);
digitalWrite(input32,HIGH);
digitalWrite(input42,LOW); delay(speed1);
} else{ // остановка робота-очистителя
digitalWrite(input1,LOW); digitalWrite(input2,LOW);
digitalWrite(input3,LOW);
digitalWrite(input4,LOW); digitalWrite(input11,LOW);
digitalWrite(input21,LOW);
digitalWrite(input31,LOW);
digitalWrite(input41,LOW);
digitalWrite(input12,LOW);
digitalWrite(input22,LOW);
digitalWrite(input32,LOW);
digitalWrite(input42,LOW); }
if (btca2a.Button(KEYCODE_BUTTON_L1)){ //
включение электромеханических реле SRD-05VDC-
SL-C, предназначенных для запуска вентиляторов
DP-FLED-WB80
digitalWrite(fan, HIGH); digitalWrite(fan1, HIGH);
}
if (btca2a.Button(KEYCODE_BUTTON_L2)){ //
выключение электромеханических реле SRD-05VDC-
SL-C, предназначенных для запуска вентиляторов
DP-FLED-WB80
digitalWrite(fan, LOW); digitalWrite(fan1, LOW);} }
```

Описанный алгоритм был апробирован на киберфизической системе очистки солнечной батареи (рис. 4). Проведенный эксперимент показал достаточную работоспособность и адекватность функционирования всех элементов системы.

Вся электроника монтируется с обратной стороны профиля, на котором собрана киберфизическая система очистки солнечной батареи. Также учтены условия охлаждения радиаторов охлаждения драйверов электродвигателей L298N, которые существенно нагреваются, т. к. биполярные шаговые двигатели 17HS3001-2B при питании от 12 В потребляют около 1 А (рис. 5).

Рис. 4. Внешний вид разработанной киберфизической системы очистки солнечной батареи

Рис. 5. Внешний вид смонтированной электроники

Разработанная киберфизическая система очистки солнечной батареи успешно прошла лабораторные испытания и показала хорошие механические и программно-аппаратные характеристики. Дальнейшие работы будут направлены на оснащение системы камерой видеонаблюдения, а также подсистемой ночного зрения, построенной на базе инфракрасных светодиодов. Кроме того, планируется проведение работ по снижению уровня электропотребления системы и повышения ее автономности, чтобы в дальнейшем можно было запитать ее от самой солнечной батареи, один из подходов это оснащение системы Li-ion аккумулятором. Также запланировано расширение киберфизической системы для применения ее на других электроэнергетических объектах, например очистка лопастей ветрогенераторов, контроль протяженных кабельных и воздушных линий электропередач, обследование труднодоступных мест электроустановок и др. Предполагается, что в будущем система будет передавать данные в облако для последующего автоматического прогнозирования периодов очистки солнечной батареи.

Библиографический список

1. *Турубанов М. А., Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В.* Импульсная система управления комбинированной солнечно- и ветроэнергетической установкой со сверхпроводниковым оборудованием // Информационно-управляющие системы. 2014. № 3. С. 8–17.

2. *Сурмагин Д. В., Бакулина А. А., Титова Г. Р.* Экономическая целесообразность электроснабжения потребителя от альтернативных источников // European Research. 2016. № 12 (23). С. 21–22.

3. Математическая модель для исследования характеристик и режимов работы ветроэнергетической установки / С. В. Соленый, А. И. Казаков, О. Я. Соленая, О. Я. Демченко // Тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы». Оренбург: Агентство «Пресса». 2016. С. 70–72.

4. *Энгель Е. А.* Интеллектуальная система управления фотоэлектрическим энергокомплексом на базе адаптивного нейроконтроллера // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 2. С. 32–38.

5. Система привода солнечной батареи: матер. Республиканской науч.-практ. конф. «Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность» / С. В. Соленый, А. Ю. Овчинников, В. Е. Белай, В. А. Николаенко. Душанбе: Промэкспо. Таджикский техн. ун-т им. академика М. С. Осими. 2016. С. 241–245.

6. Специализированные роботы в энергетике / М. Л. Шит, С. Г. Школьник, Э. С. Андреев // Проблемы региональной энергетики. 2014. № 1 (24). С. 63–70.

7. Концепция построения интеллектуальных защищенных систем управления для объектов децентрализованной энергетики / Л. И. Чубраева, А. Л. Ронжин, А. В. Шишлаков и др. // Труды СПИИРАН, 2014. Вып. 33. С. 207–226.

8. *Щекотов М. С., Кашевник А. М.* Сравнительный анализ систем позиционирования в помещениях, основанных на технологиях связи, поддерживаемых смартфонами // Труды СПИИРАН, 2012. Вып. 23. С. 459–471.

9. [Электронный ресурс]. URL: http://www.multiwood.ru/download/TechnicaldescriptionNP-65GK.pdf.

УДК 681.58:004.896

М. А. Турубанов[1]
старший преподаватель

М. В. Турубанова[2]
магистр

С. Н. Трубенева[3]
старший преподаватель
[1,2,3]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Статья посвящена разработке универсального модуля широтно-импульсной модуляции, предназначенного для применения в робототехнических системах, в которых необходимо управлять большим количеством исполнительных механизмов.

Ключевые слова: *микропроцессорные системы управления, робототехника.*

M. A. Turubanov[1]
Senior Lecturer

M. V. Turubanova[2]
Postgraduate Student

S. N. Trubeneva[3]
Senior Lecturer
[1,2,3]*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

UNIVERSAL MULTICHANNEL PWM MODULE FOR ROBOTICS APPLICATION

The article introduces universal PWM module, which can be used in different robotics systems comprising big amount of servos or similar type devices.

Keywords: *digital control systems, robotics.*

Обширное применение в робототехнике получили сервопреобразователи с широтно-импульсным управлением. Такого типа устройства применяются для управления различными подвижными элементами, такими как сочленения конечностей в роботах. Сервопреобразователь состоит из электродвигателя, заключенного в один корпус с редуктором, и управляющей электроники (рис. 1), которая чаще всего состоит из потенциометра обратной связи и платы управления.

Рис. 1. Сервопреобразователь

В зависимости от типа использованной электроники сервопреобразователи делятся на аналоговые и цифровые. Аналоговые сервопреобразователи содержат относительно простую цепь управления позиционированием. Цифровые сервопреобразователи содержат микроконтроллер в

цепи обратной связи, что позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления. Цифровые сервопреобразователи обеспечивают более быструю и точную отработку благодаря встроенным бесколлекторным моторам, однако обладают более высокой стоимостью.

Как аналоговые, так и цифровые сервопреобразователи имеют унифицированный интерфейс подключения к устройству управления, основанный на широтно-импульсной модуляции. При таком способе управления угол поворота задается длительностью импульса, при этом период следования импульсов должен быть равен 20 мс (рис. 2) [1, 2].

Зависимость угла поворота от длительности импульса линейная, график зависимости приведен на рис. 3.

Синтезировать требуемый сигнал можно различными способами, как программно, так и аппаратно. В разрабатываемом модуле количество каналов управления равно 12, при таком количестве каналов одного модуля будет достаточно для управления гексаподом с двумя осями свободы на каждую опору. Из-за большого количества каналов управления при программной реализации потребуется использовать значительные вычислительные ресурсы микроконтроллера, и наиболее оптимальным является вариант аппаратной реализации.

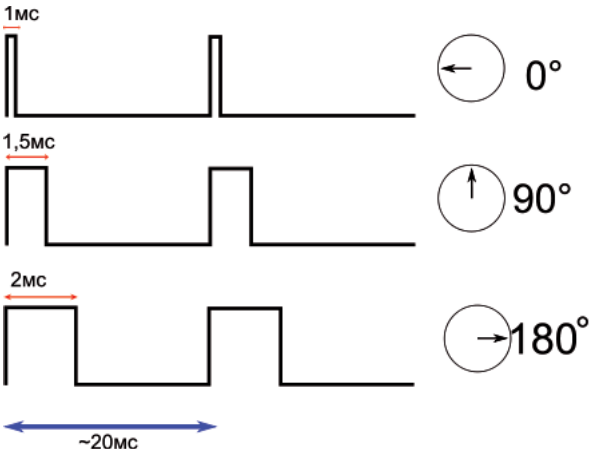


Рис. 2. Управление сервопреобразователем с помощью широтно-импульсной модуляции

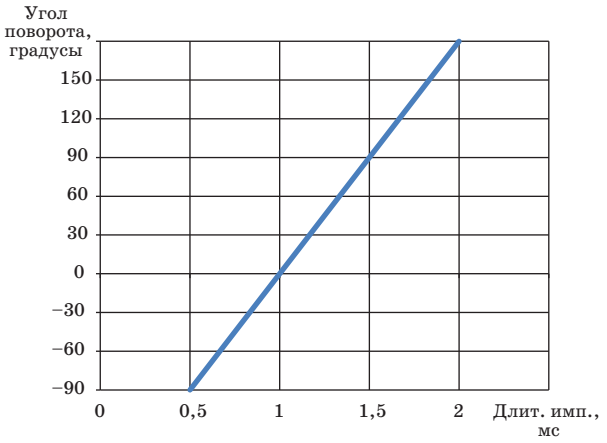


Рис. 3. Зависимость угла поворота от длительности управляющего импульса

При аппаратной реализации с помощью средств самого микроконтроллера будут задействованы таймеры общего назначения, на базе которых создается ШИМ-модулятор. Таймер работает следующим образом: значение регистра таймера увеличивается на 1 с частотой счета, когда значение регистра становится больше значения регистра сравнения для данного таймера, один из выводов микроконтроллера изменяет свое состояние из 1 в 0; при переполнении таймера регистр таймера обнуляется, а состояние вывода переводится в 1.

В качестве микроконтроллера для модуля был выбран микроконтроллер STM32F030C6T6 с ядром ARM Cortex-M0. В выбранном микроконтроллере разрядность таймера равна 16, т. е. предельное значение счета равно 65535, чтобы период таймера был равен 20 мс, необходимо, чтобы частота счета была равна:

$$f_c = \frac{65535}{20 \cdot 10^{-3}} = 3{,}2 \text{ МГц}.$$

При тактовой частоте 40 МГц необходимо задать предделитель частоты таймера, значение которого равно:

$$PD = \frac{40}{3{,}2} = 12{,}5.$$

Значение нам необходимо округлить до ближайшего целого, и оно будет равно 12, при этом фактическая частота переключения таймера будет равна:

$$f_c = \frac{40 \text{ МГц}}{12} = 3{,}33 \text{ МГц}.$$

В таком случае значение угла поворота от значения регистра сравнения таймера имеет вид

$$\varphi(CR) = \left(\frac{CR}{f_c} - t_0 \right) \cdot \frac{180^\circ}{t_{180} - t_0},$$

где CR – значение регистра сравнения;

t_0 – длительность импульса при нулевом значении угла (1 мс);

t_{180} – длительность импульса при угле поворота 180° (2 мс).

Подставив известные значения, получим окончательное выражение

$$\varphi(CR) = \frac{180}{3333} CR - 180.$$

Так, чтобы сервопреобразователь повернулся в нулевое значение, необходимо в регистр сравнения записать значение 3333, чтобы преобразователь повернулся на угол 180°, в регистр на-

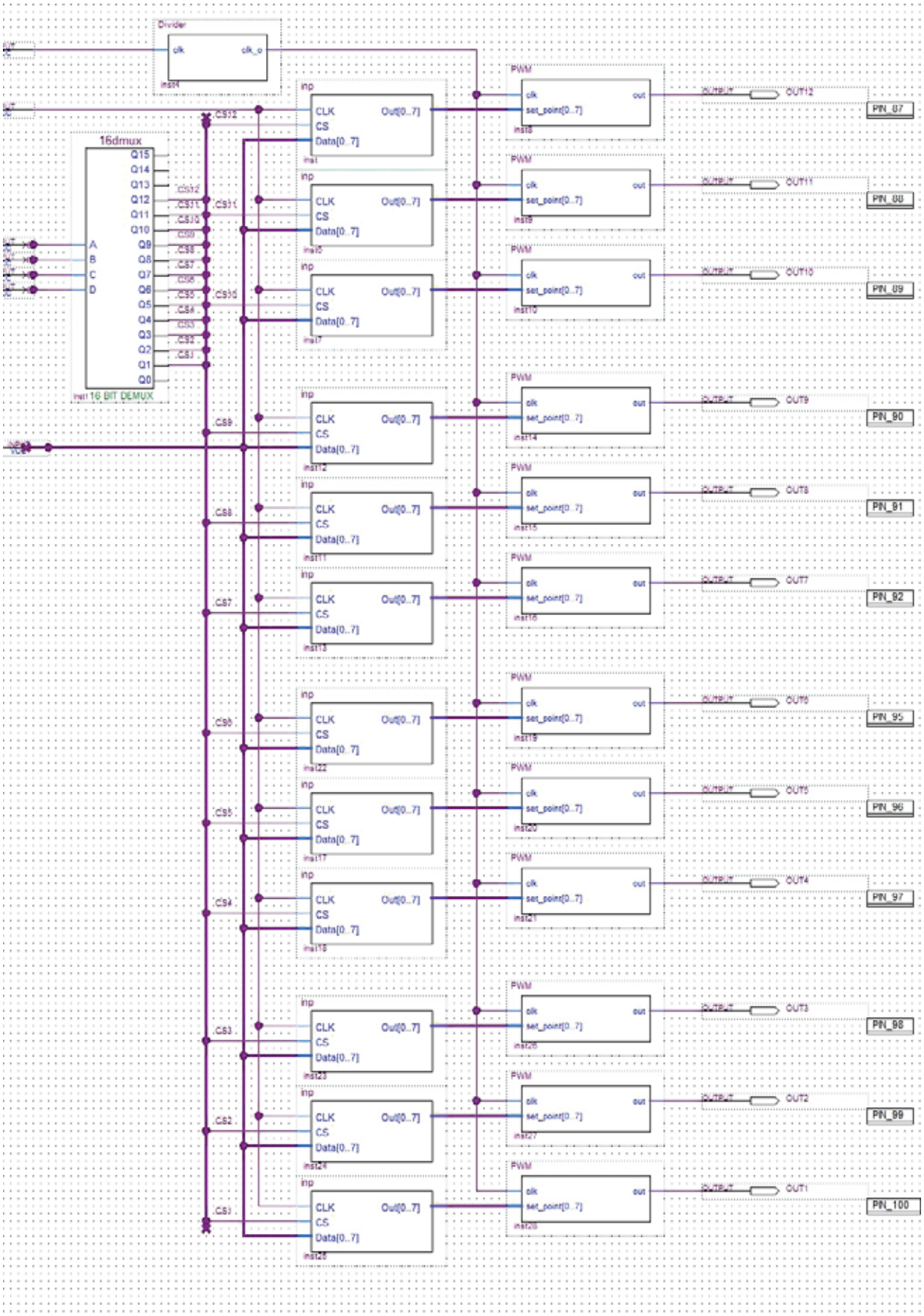


Рис. 4. Внутренняя структура (архитектура) разработанной микросхемы

до занести значение равное 6666. Так как в регистр можно заносить только целые значения, то точность позиционирования ограничена, помимо точности самого преобразователя, точностью квантования. Найти точность позиционирования можно так:

$$\Delta = \varphi(CR+1) - \varphi(CR) = \left(\frac{180}{3333}(CR+1) - 180\right) - \left(\frac{180}{3333}CR - 180\right) = \frac{180}{3333} = 0{,}054^\circ = 3{,}2'.$$

Точность позиционирования сервопреобразователей составляет 0,6 угл. мин [2], и, чтобы добиться максимальной точности, необходимо использовать дополнительные технические решения. Одним из вариантов может быть реализация ШИМ-модулятора на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), потому что на них можно реализовать таймер с модулятором произвольной разрядности (16, 24, 32 бит и т. п.).

Такой контроллер реализуется в виде цифровой схемы, описанной на языках VHDL либо VERILOG, и представляет собой регистр таймера, регистр-защелку с параллельной загрузкой и компаратор. Внутренняя структура микросхемы приведена на рис. 4.

Помимо описанных регистров, в архитектуре содержится две шины: шина адреса и шина данных. Шина данных выходит наружу микросхемы, а шина адреса работает через 16-разрядный дешифратор (используется только 12 разрядов), вход которого также выходит наружу. Реализовать приведенную выше схему можно внутри ПЛИС EPM240 фирмы Altera.

Работает схема следующим образом: микроконтроллер выставляет на шину данных требуемое значение модулятора, на шину адреса номер канала, по которому значение надо изменить, и переводит сигнал записи из 1 в 0, выдерживает сигнал некоторое время, после чего возвращает его в 1. В момент перехода сигнала записи из 1 в 0 регистр параллельной загрузки выбранного канала выставляет у себя на выходе значение, считанное с шины данных. Работа самого модулятора аналогична работе модулятора в микроконтроллере.

Для расширения функционала модуля в схему были также введены аналоговые входы и несколько интерфейсов цифрового ввода-вывода, что позволяет включать несколько таких модулей на одну информационную шину и, как следствие, комбинировать несколько модулей. На рис. 5 представлен общий вид платы универсального модуля, а его параметры представлены в табл. 1.

Разработанный робототехнический модуль может быть использован как в образовательных, так и прикладных задачах, в которых требуется управление исполнительными механизмами при помощи широтно-импульсной модуляции. Благодаря наличию аналоговых входов и цифровых интерфейсов SPI и I2C с помощью данного модуля можно решить широкий спектр прикладных задач, таких как:

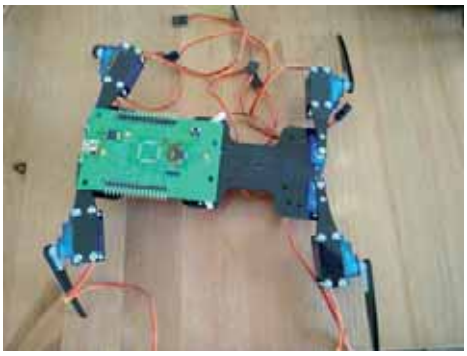


Рис. 5. Универсальный модуль широтно-импульсной модуляции, установленный на гексаподе (макетный образец, микросхема ПЛИС не запаяна)

Таблица 1

Параметры универсального модуля широтно-импульсной модуляции

Каналов ШИМ, шт.	12
Разрядность ШИМ, бит	19
Частота тактирования (разрешающая способность ШИМ), МГц	18
Аналоговых входов, шт.	3
Интерфейсов SPI	1
Интерфейсов I2C	1
Интерфейсов UART	1, с возможностью организации шины
Напряжение питания, В	5

– управление роботизированным шасси с количеством степеней свободы до 12 и более (при числе степеней свободы больше 12 необходимо включение дополнительных модулей по шине UART);

– гиростабилизация летательного аппарата (квадрокоптер, мультикоптер и др.);

– система автоматического управления летательным аппаратом.

В дальнейшем возможна доработка модуля, направленная на улучшение программного обеспечения, его универсализации и на создание единого протокола взаимодействия с внешним оборудованием.

Библиографический список

1. ACTUATORS – SERVOS. Society of Robots. [Электронный ресурс]. URL: //http://www.societyofrobots.com/actuators_servos.shtml.

2. Hitec HSR-8498HB Digital Servo Operation and Interface. Revision 0.5. // Robosavvy ltd, London, United Kingdom.

УДК 621.865.8

С. Ф. Яцун
доктор технических наук, профессор
Юго-Западный государственный университет

Е. Н. Политов
кандидат технических наук, доцент
Юго-Западный государственный университет

К. Г. Казарян
аспирант
Юго-Западный государственный университет

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОНИЧЕСКОГО РОБОТА-РЫБЫ

Статья посвящена экспериментальным исследованиям бионического плавающего робота-рыбы, состоящего из корпуса, боковых плавников, предхвостия и хвоста. Робот может двигаться в следующих режимах: движение вперед, поворот, вертикальное погружение/всплытие, динамическое погружение/всплытие (погружение/всплытие при движении вперед). Для проведения экспериментов были разработаны требования к окружающей среде и средствам измерения, а также методика испытаний. Результаты экспериментов были проанализированы путем их сравнения с данными численного моделирования, расхождение результатов не превысило 10%.

Ключевые слова: *бионический плавающий робот, робот-рыба, опытный образец, методика испытаний, экспериментальные исследования.*

S. F. Jatsun
Dr. Sc., Tech., Professor
Southwest State University

E. N. Politov
PhD, Tech., Associate Professor
Southwest State University

K. G. Kazaryan
PhD Student
Southwest State University

METHODS OF TESTING AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF BIONIC ROBOT FISH

The article is devoted to experimental investigation of a bionic swimming robot fish. Robot consists of body, side fins, peduncle and tail. The robot can move in the following modes: move forward, turn, vertical immersion / emersion, dynamic immersion / emersion (immersion / emersion when moving forward). For the experiments were developed requirements to the environment and to the measuring devices and testing methods. The experimental results were analyzed by comparing with numerical simulations, the divergence of results has not exceeded 10%.

Keywords: *bionic swimming robot, robot fish, prototype, testing methods, experimental research.*

Введение

Одним из самых перспективных направлений развития подводных роботов является использование в них бионических принципов движения. Бионика – пограничная наука между биологией и техникой, решающая инженерные задачи на основе моделирования структуры и жизнедеятельности организмов.

Использование бионических способов локомоций для создания роботов-рыб началось с создания автономного плавательного аппарата

Robotuna MIT в 1994 г. [1]. Затем последовали разработки роботов-рыб в США, Великобритании, Японии, Китае, Таиланде [2–10].

В данной статье рассматривается опытный образец робота-рыбы, разработанный исследователями Юго-Западного государственного университета Курска [11–15]. Представлена методика испытаний, в том числе требования к измерительным приборам и параметрам окружающей среды. Анализ полученных экспериментальных данных проведен путем их сравнения с теоретическими результатами.

Описание конструкции опытного образца робота-рыбы

Опытный образец робота-рыбы состоит из четырех конструктивных частей: корпуса *1*, предхвостия *2*, хвоста *3* и боковых плавников *4* (рис. 1) [11–15].

Предхвостие и корпус, хвост и предхвостие, боковые плавники и корпус соединены между собой шарнирами, посредством которых предхвостие и хвост поворачиваются относительно осей, параллельных продольной оси корпуса, а боковые плавники – относительно оси, параллельной поперечной оси корпуса. Повороты звеньев друг относительно друга реализуются при помощи приводов, причем приводы предхвостия и боковых плавников расположены в корпусе, а привод хвоста в предхвостии.

Также в корпусе находятся следующие подсистемы: погружения и всплытия, видеонаблюдения, освещения, электропитания, навигации. Помимо этого робот оснащен системой управления, которая обеспечивает согласование работы всех подсистем, а также реализует дистанционное управление перемещением робота.

Робот-рыба может двигаться следующим образом: поступательно вперед, поворачиваться в горизонтальной плоскости, погружаться и всплывать в двух режимах: вертикально и динамически. Поступательное движение робота осуществляется за счет колебательного движения хвостового плавника, поворот в горизонтальной плоскости – за счет поворота предхвостия относительно корпуса робота. Вертикальное погружение/всплытие реализуется за счет регулирования архимедовой силы при помощи забора/вытеснения забортной воды. Для этого в корпусе установлен гидроцилиндр с соответствующим приводом. При динамическом погружении робот движется вперед и вверх-вниз одновременно. Такой режим возможен за счет изменения угла наклона боковых плавников относительно продольной оси корпуса и работы предхвостия и хвоста. Тогда при движении вперед за счет хвоста и предхвостия робот будет погружаться при повороте боковых плавников по часовой стрелке относительно продольной оси и, наоборот, будет всплывать, если поворот боковых плавников будет осуществляться против часовой стрелки.

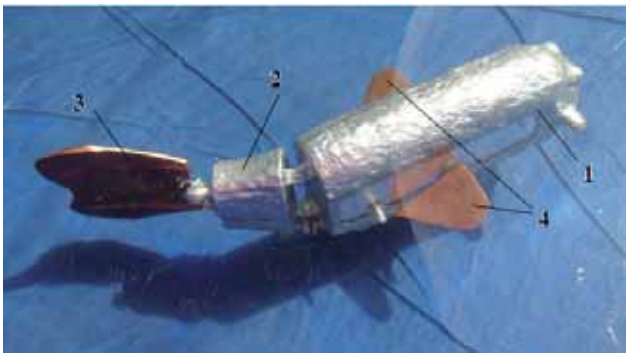


Рис. 1. Конструкция опытного образца робота-рыбы: 1 – корпус; 2 – предхвостие; 3 – хвост; 4 – боковые плавники

Основные технические характеристики разработанного опытного образца бионического плавающего робота представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики робота-рыбы

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Габариты (длина × высота × ширина), м	0,70 × 0,23 × 0,28
2	Водоизмещение, кг	5,9
3	Емкость аккумуляторных батарей, мА/ч	3500
4	Количество независимых приводов, шт.	4
5	Дальность беспроводного управления, м	150
6	Дальность передачи видеоизображения, м	10
7	Мощность светодиодных прожекторов, Вт	10
8	Максимальная скорость горизонтального движения под водой, м/с	0,4
9	Минимальный радиус поворота, м	1,0
10	Максимальная скорость вертикального погружения (всплытия), м/с	0,05
11	Угол размаха хвостового плавника, °	0…30
12	Угол поворота предхвостия, °	0…25
13	Угол поворота боковых плавников, °	–30…+30
14	Частота колебаний хвостового плавника, Гц	0…5
15	Энергопотребление при максимальных скоростных режимах движения, Вт	55

Экспериментальные исследования опытного образца робота-рыбы

Целью проведения экспериментальных исследований являлась проверка эффективной работы всех подсистем разработанного робота в условиях натурных испытаний в водной среде, а также определение его технических характеристик.

Экспериментальные исследования опытного образца собранного робота осуществлялись в трех видах водоемов: в двух видах бассейнов (мелководном и глубоководном) и в натурных условиях на Курском водохранилище (рис. 2).

Испытания проводились при диапазонах параметров окружающей среды, указанных в табл. 2.

Измерения параметров проводились по истечении времени установления рабочих режимов испытываемой аппаратуры и средств измерений, применяемых при испытаниях.

Таблица 2

Параметры окружающей среды

№ п/п	Наименование параметра	Значения параметра
1	Температура окружающего воздуха, °С	+19...+25
2	Относительная влажность воздуха, %	40...60
3	Атмосферное давление, мм рт. ст.	720...780

Требования, предъявляемые к средствам измерения

Измерительная аппаратура и другие средства измерения при проведении испытаний были поверены. Перечень используемых средств измерений и их метрологические характеристики приведены в табл. 3.

а)

б)

в)

Рис. 2. Испытания робота: а) в мелководном бассейне; б) в глубоководном бассейне; в) на Курском водохранилище

Таблица 3

Средства измерений и их метрологические характеристики

№ п/п	Наименование	Основные метрологические характеристики	Назначение
1	Аналого-цифровой преобразователь ZET 210 Sigma USB	Количество входных каналов – 8 дифференциальных или 16 синфазных; частота преобразования – до 500 кГц; количество разрядов АЦП – 16; максимальное входное напряжение ±7 В	Измерение и регистрация вибрационных сигналов
2	Предварительный усилитель ZET 411	Количество каналов – 2 дифференциальных; частота выходного сигнала – до 80 кГц; максимальное входное напряжение ±5 В; коэффициент усиления 1,10,100, 1000	Усиление сигналов в системах измерения, обработки сигналов и управления

Окончание табл. 3

№ п/п	Наименование	Основные метрологические характеристики	Назначение
3	Акселерометр BC 202	Номинальная осевая чувствительность – 100±5% мВ/g; частотный диапазон – 0...2500 Гц; амплитудный диапазон – 18 g; собственные шумы, СКЗ, не более 7 mg; уровень постоянного напряжения на выходе – 1,8 ±5% В	Измерение виброускорений фрикционных автоколебаний
4	Ноутбук Lenovo G555	Процессор AMD Athlon(tm) II Dual Core; тактовая частота процессора 2,09 ГГц; ОЗУ – 1,74 ГБ	Сбор, хранение и обработка сигналов
5	Секундомер	Точность показаний ±0,1 с, диапазон измеряемых величин 0–2 ч	Измерение времени движения робота на участках траектории
6	Мерный шнур	Точность измерений – 1 см, диапазон измерения 0–15 м	Измерение глубин погружения устройства, измерение горизонтальных перемещений в водной среде
7	Термометр электронный, цифровой, двухканальный	Дискретность показаний 0,1°С	Контроль температуры окружающей среды и температуры воды в испытательном водоеме
8	Барометр	Основная погрешность ±1 мм рт. ст.	Контроль атмосферного давления
9	Психрометр	Класс точности 2.0	Контроль относительной влажности воздуха

Методика испытаний

При проведении экспериментальных испытаний количественной и качественной оценке подлежали:

– устойчивое положение робота во время плавания и погружения;

– герметичность корпуса;

– дальность управляемости в зависимости от глубины погружения;

– диапазон скоростей горизонтального движения в подводном положении;

– скорость динамического погружения и всплытия;

– радиус разворота в горизонтальной плоскости;

– скорость статического (вертикального) погружения и всплытия;

– глубина погружения, с которой возможно безаварийное всплытие робота;

– качество функционирования подсистем освещения, видеонаблюдения, питания.

Содержание и последовательность действий при проведении испытаний опытного образца бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере представлены в табл. 4.

Некоторые результаты проведенных испытаний и их анализ представлены ниже.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований и испытаний

Результаты экспериментальных исследований сопоставлялись с теоретическими результатами, полученными при численном моделировании динамического поведения робота-рыбы [12, 14].

На рис. 3 представлены графики зависимостей скорости плавания V робота от частоты ω

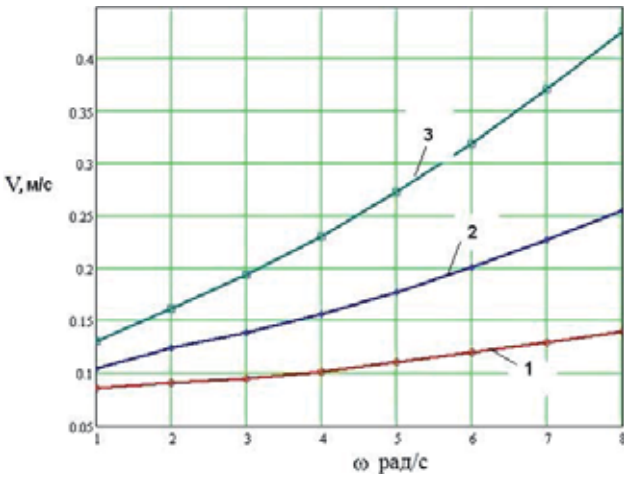


Рис. 3. Графики V(ω), полученные при математическом моделировании: 1 – θ=10°; 2 – θ=20°; 3 – θ=30°

Таблица 4

Общая методика проведения испытаний

№ п/п	Содержание этапа исследований	Форма представления результата
1	2	3
1	Проверка уровня зарядки аккумуляторов автономного питания робота, блока управления, измерительной аппаратуры	–
2	Проверка работоспособности всех приводов и подсистем управления роботом «на суше»: – привода хвостового плавника; – привода предхвостия; – подсистемы динамического погружения и всплытия с приводом боковых плавников; – подсистемы вертикального погружения и всплытия; – подсистемы видеонаблюдения; – подсистемы освещения; – подсистемы навигации	–
3	Проверка работоспособности подсистем блока управления: – подсистемы дистанционного управления приводом хвостового плавника; – подсистемы дистанционного управления приводом предхвостия; – подсистемы дистанционного управления приводом боковых плавников; – подсистемы дистанционного управления приводом статического погружения и всплытия	–
4	Проверка работоспособности приемно-измерительного и регистрирующего аппаратурного комплекса: – подсистемы видеонаблюдения и технического зрения; – подсистемы приема, обработки и регистрации информационного сигнала	–
5	Проверка герметичности корпуса робота путем создания избыточного давления (до 1,5 ± 0,2 атм) внутри корпуса и отслеживание его изменения	–
6	Исследование скоростных свойств движения робота в водной среде при движении по горизонтальным траекториям в соответствии с планом оптимального планирования экспериментов	Протоколы экспериментов, результаты обработки экспериментальных данных
7	Исследование маневренности движения робота в горизонтальной плоскости, определение минимального радиуса поворота в горизонтальной плоскости	Протоколы экспериментов, результаты обработки экспериментальных данных
8	Исследование скоростей динамического погружения робота за счет боковых плавников в движении	Протоколы экспериментов, результаты обработки экспериментальных данных
9	Определение максимальной глубины погружения робота	Протоколы экспериментов, результаты обработки экспериментальных данных
10	Исследование скоростей вертикального погружения робота	Протоколы экспериментов, результаты обработки экспериментальных данных
11	Исследование предельных расстояний управляемости робота	Протоколы экспериментов, результаты обработки экспериментальных данных
12	Определение времени непрерывной работы устройства в штатном режиме (не менее 30 мин)	Протокол экспериментов
13	Компьютерная обработка результатов экспериментальных исследований и натурных экспериментов с применением программы «Оптимальное планирование эксперимента»	Таблицы, графики, расчетные формулы
14	Определение оптимальных значений варьируемых параметров	Таблицы, графики, расчетные формулы
15	Анализ результатов испытаний и принятие решений	Выводы
16	Формирование замечаний и предложений по результатам испытаний	Протокол замечаний
17	Оформление результатов	Отчет

колебаний хвостового плавника для трех значений амплитуд углов его поворота θ, полученные в ходе математического моделирования. А на рис. 4 – график зависимости скорости плавания робота-рыбы от частоты колебаний хвостового плавника при угле размаха θ = 30°, зафиксированных по результатам натурного эксперимента.

По графикам рис. 3 видно, что при численном моделировании скорость движения робота возрастает почти пропорционально увеличению частоты колебаний хвоста, причем по мере роста амплитуды этих колебаний значение скорости при одной и той же величине ω увеличивается. При экспериментальных исследованиях наблюдается аналогичная зависимость, но скорость движения робота при этом меньше моделируемой, расхождение значений не превышает 10%.

На рис. 5 представлен график зависимости средней скорости V_{sr} горизонтального движения робота в полностью погруженном положении от частоты колебаний хвостового плавника ω.

Как следует из анализа представленного графика, увеличение частоты колебаний хвостового плавника приводит к нелинейному росту средней скорости перемещения робота, причем форма графика имеет вид кривой «насыщения». Это вызвано ростом сопротивления движения робота в воде с увеличением скорости. Поэтому для экономичного режима движения робота следует использовать частоты колебаний хвостового плавника в интервале от 1 до 3 рад/с.

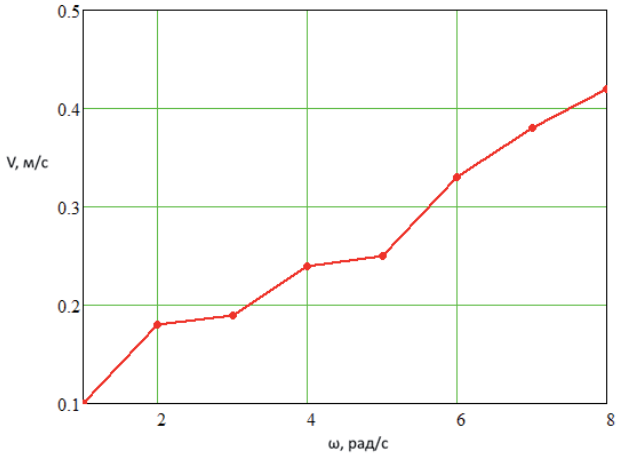


Рис. 4. График V(ω), полученный экспериментально, при θ=30°

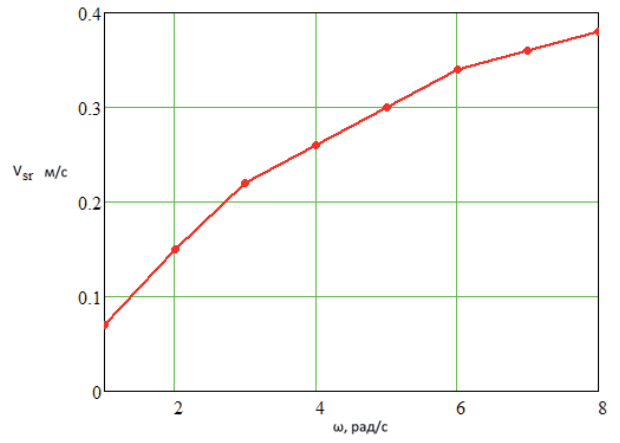


Рис. 5. График V_{sr}(ω), полученный экспериментально

Заключение

Статья посвящена экспериментальным исследованиям опытного образца бионического плавающего робота-рыбы. Описана конструкция устройства, отличительными особенностями которой является то, что она состоит из четырех основных частей: корпуса, боковых плавников, предхвостия и хвоста, причем эти части могут совершать повороты друг относительно друга. Робот может двигаться прямолинейно и осуществлять поворот в горизонтальной плоскости, а также способен погружаться и всплывать как вертикально, так и динамически.

Испытания робота проводились в трех видах водоемов: в двух бассейнах разной глубины и в открытом естественном водоеме. В работе описана методика испытаний опытного образца, приведены требования к параметрам окружающей среды и средствам измерения. Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований, проведено их сравнение с теоретическими данными, расхождение результатов не превышает 10%.

Библиографический список

1. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/RoboTuna (дата обращения: 13.03.2017).

2. [Электронный ресурс]. URL: http://fibo.kmutt.ac.th/project/eng/current_research/fish.html (дата обращения: 13.03.2017).

3. [Электронный ресурс]. URL: http://mhi.ru (дата обращения: 13.03.2017).

4. [Электронный ресурс]. URL: http://www.servihoo.com (дата обращения: 13.03.2017).

5. [Электронный ресурс]. URL: http://news.bbc.co.uk (дата обращения: 13.03.2017).

6. [Электронный ресурс]. URL: http://www.robots.net/article/641.html (дата обращения: 13.03.2017).

7. [Электронный ресурс]. URL: http://privatewww.essex.ac (дата обращения: 13.03.2017).

8. [Электронный ресурс]. URL: http://www.nmri.go.jp (дата обращения: 13.03.2017).

9. Расчет сил, возникающих на плавниковом вибродвижителе / С. Л. Цыфанский, Я. А. Виба, О. В. Кононова и др. // Вибрация-2010. Управляемые вибрационные технологии и машины. Курск, 2010. Ч. 1. С. 18–23.

10. *Цыфанский С. Л., Виба Я. А., Якушевич В. А.* Исследование работы плавникового движителя гидробионта // Вестник науч.-техн. развития. Национальная технологическая группа. 2009. № 9 (25). С. 32–41.

11. *Безмен П. А., Политов Е. Н., Казарян К. Г.* Подводный плавающий робот с геопозиционированием // Естественные и технические науки. 2016. № 6 (96). С. 111–115.

12. *Лушников Б. В., Политов Е. Н., Тарасова Е. С.* Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере // Cloud of Science. 2014. Т. 1. № 1. С. 61–77.

13. Пат. на полезную модель RUS 124656 05.06.2012. Подводный плавающий робот с бионическим принципом движения / Б. В. Лушников, С. Ф. Яцун, К. Г. Казарян и др.

14. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Б. В. Лушников, С. И. Савин, К. Г. Казарян и др. // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст. по матер. X науч.-техн. конф.: в 2 ч. 2012. С. 106–110.

15. Компьютерное моделирование динамики бионического плавающего робота / Б. В. Лушников, С. Ф. Яцун, Е. Н. Политов, Е. С. Тарасова // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2010. Т. 12. № 4 (3). С. 562–567.

УДК 539.51-629.7

В. С. Акопов[1]
кандидат технических наук, старший научный сотрудник

И. А. Салова[2]
кандидат технических наук, доцент
[1,2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЕРЗАНИЯ ВОДЫ В ТРУБОПРОВОДАХ НАРУЖНОЙ ЧАСТИ ВОДОПРОВОДА

Рассмотрено моделирование системы защиты воды от замерзания в трубопроводах наружной части водопроводной системы посредством метода конечных элементов. Получены динамические характеристики процесса нагревания воды от температуры + 1 °С для стальных водопроводных труб в условиях различных температур окружающей среды и силы ветра.

Ключевые слова: *теплозащита, саморегулирующийся греющий кабель, моделирование, метод конечных элементов.*

V. S. Akopov[1]
PhD, Tech., Senior Researcher

I. A. Salova[2]
PhD, Tech., Associate Professor
[1,2]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE STUDY OF THERMAL PROTECTION FROM WATER FREEZING ON THE OUTER PART OF PIPELINE

The paper discusses the modeling of water protection system from freezing in the outer part pipeline of the water system by the finite element method. The dynamic characteristics of the water heating process from temperature + 1°C for steel water pipes in the conditions of various ambient temperatures and wind strength are obtained.

Keywords: *thermal protection, self-regulating heating cable, simulation, finite element method.*

Целью данной работы является исследование процессов теплообмена и возможности защиты воды в наружной части водопроводной системы от замерзания. Для защиты водопроводной системы предлагается использовать греющие кабели и датчики температуры наружного воздуха. При срабатывании термореле подается напряжение питания на греющий кабель при температуре поверхности водопроводной трубы, близкой к нулю. Упрощенная схема такой системы (в двух проекциях) представлена на рис. 1. На этом рисунке приняты следующие обозначения: *1* – труба водопровода; *2* – греющий кабель; К – контакт термореле; *Uc* – напряжение электропитания.

В качестве греющего кабеля рассматривается саморегулирующийся электрический кабель, широко применяющийся в противооблединительных системах зданий и сооружений [1, 2]. Далее в качестве примера использованы данные саморегулирующегося кабеля 60VC-F [3]. Принцип его работы [3, 4] заключается в следующем. Полупроводящую матрицу можно условно представить в виде большого числа сопротивлений, подключенных параллельно к токопроводящим жилам. При подаче напряжения на разомкнутые токопроводящие жилы в полупроводящей матрице возникает ток, вызывающий выделение тепла. За счет тепла материал матрицы расширяется, контакты между отдельными частицами углерода нарушаются, растет сопротивление матрицы и уменьшается

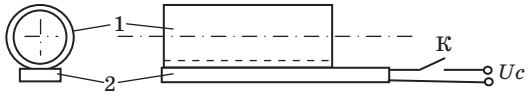


Рис. 1. Упрощенная схема системы защиты воды в трубопроводах наружной части водопроводной системы

ток. Через некоторое время (не более 5 минут) ток и температура стабилизируются. Сопротивление матрицы, приведенное к 1 м, обычно составляет несколько сот ом, благодаря этому саморегулирующиеся нагревательные кабели обладают следующими уникальными свойствами:

1. Могут использоваться при подключении на полное напряжение любыми длинами от минимальных (десятки сантиметров) до предельно допустимых, без специальных расчетов. Данное свойство особенно ценно, когда заранее неизвестна длина обогреваемого трубопровода.

2. Они способны изменять свое тепловыделение локально. Если на обогреваемом объекте в какой-либо зоне температура повышается, то тепловыделение саморегулирующейся ленты в этой зоне падает. Данное свойство значительно повышает безопасность системы обогрева и упрощает процесс монтажа саморегулирующихся кабелей, поскольку допускается сближение и пересечение кабелей друг с другом.

В настоящей работе рассмотрено моделирование системы защиты воды от замерзания в трубопроводах наружной части водопроводной системы посредством метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ELCUT [6]. Исследования процессов изменения температуры выполнялись для стальных водопроводных труб сечением 20 мм. На рис. 2 представлена геометрическая модель, для которой приняты следующие обозначения: *1* – труба; *2* – вода; *3* – саморегулирующийся кабель VC-F; *4* – контур задания граничных условий (выделен жирно). Для моделирования в ELCUT необходимо задать свойства кабеля, трубы и воды, а также на границе *4* задать температуру окружающей среды $T_н$ и коэффициент конвекции α. Для VC-F кабеля задается удельная плотность $\rho = 2163$ кг/м^3, удельная теплопроводность $\lambda = 0{,}25$ Вт / (м·°К), теплоемкость $C_р = 750$ Дж / (кг·°К), а также зависимость линейной мощности P (на 1 м длины) кабеля от температуры [7]. Для стальной трубы приняты следующие свойства материала: удельная плотность $\rho = 7866$ кг/м^3, удельная теплопроводность $\lambda = 48$ Вт/(м·°К), теплоемкость $C_р = 610$ Дж/(кг·°К). Для воды перечисленные свойства зависят от текущего значения температуры. Эти зависимости приведены в [7]. В модели пренебрегаем тепловыми потерями за счет лучистой теплоотдачи, которая зависит от температуры воздуха и температуры поверхности трубы, а также от степени черноты поверхности трубы.

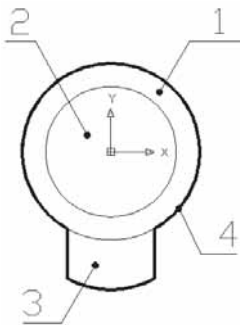


Рис. 2. Геометрическая схема объекта моделирования

Полученные в процессе исследований динамические характеристики процесса нагревания воды от температуры +1 °С для стальных водопроводных труб в условиях различных температур окружающей среды показаны ниже на рис. 3–7. На рис. 3 приведены кривые изменения

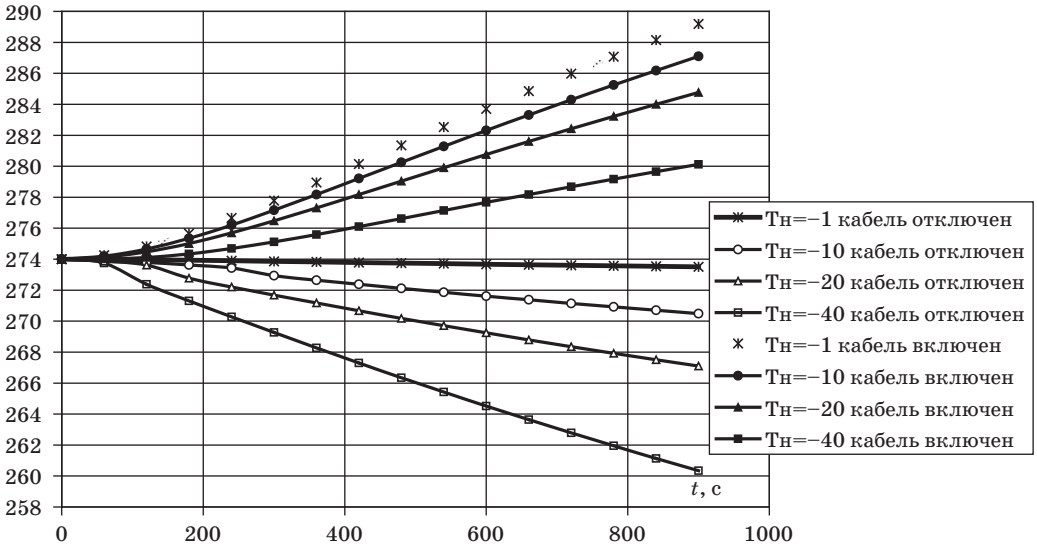


Рис. 3. Динамика изменения температуры воды в центре трубопровода при различных температурах $T_н$ наружной среды с включенным греющим кабелем и без него

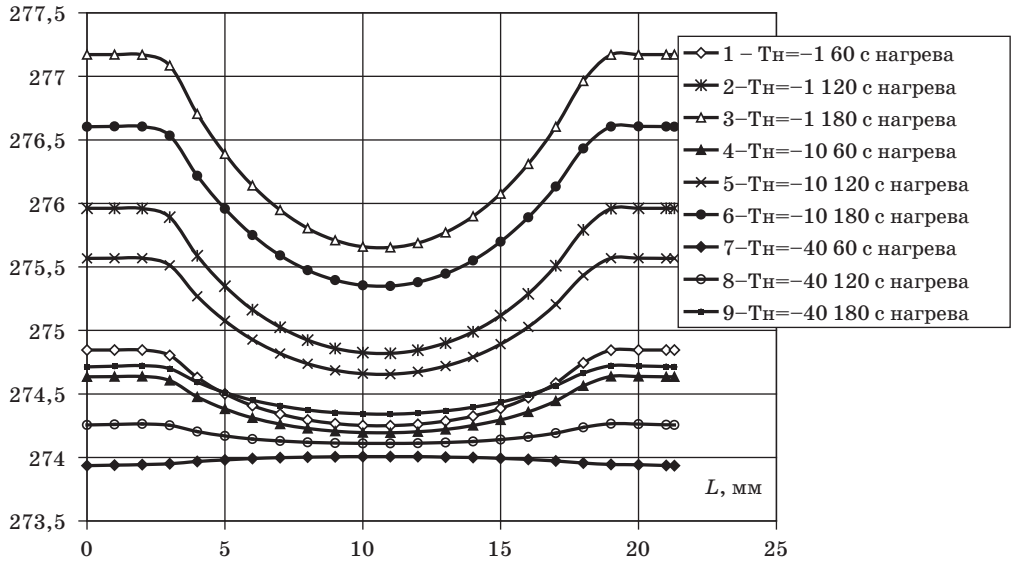


Рис. 4. Динамика распределения температуры по поперечному сечению водопроводной трубы при ее нагреве греющим кабелем в условиях различной температуры $T_н$ наружной среды

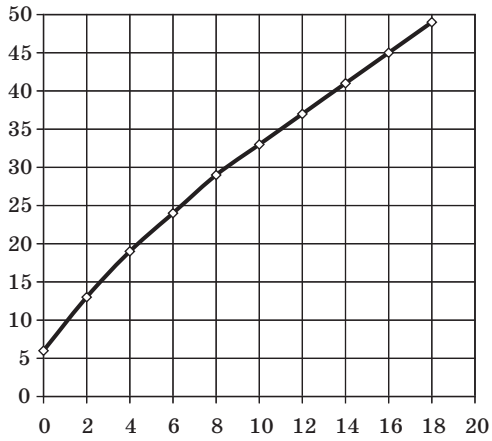


Рис. 5. График зависимости коэффициента конвекции α от силы ветра V

температуры воды в центре трубопровода при различных температурах *T*н наружной среды с включенным греющим кабелем и без него.

Распределение температуры по поперечному сечению водопроводной трубы с водой в разные моменты времени при трех значениях температуры окружающей среды $T_н = –1$ °С, $T_н = –10$ °С и $T_н = –40$ °С показано на рис. 4 (кабель включен).

Поскольку эффективность рассматриваемой системы, безусловно, будет зависеть не только от температуры воздуха, но и от движения воздушной среды вокруг трубопровода, выполнено исследование влияния силы ветра на процессы в электротепловой системе (для различных температур окружающей среды: от $T_н = –1$ °С до $T_н = –40$ °С). Сила ветра учитывалась посред-

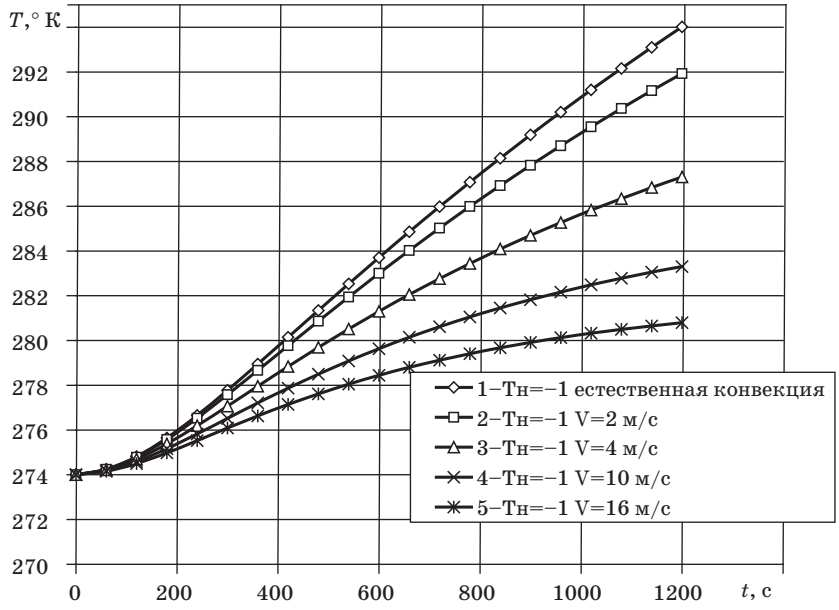


Рис. 6. Динамика нагрева воды в центре трубы греющим кабелем при $T_н = –1$ °С и вариации скорости ветра V

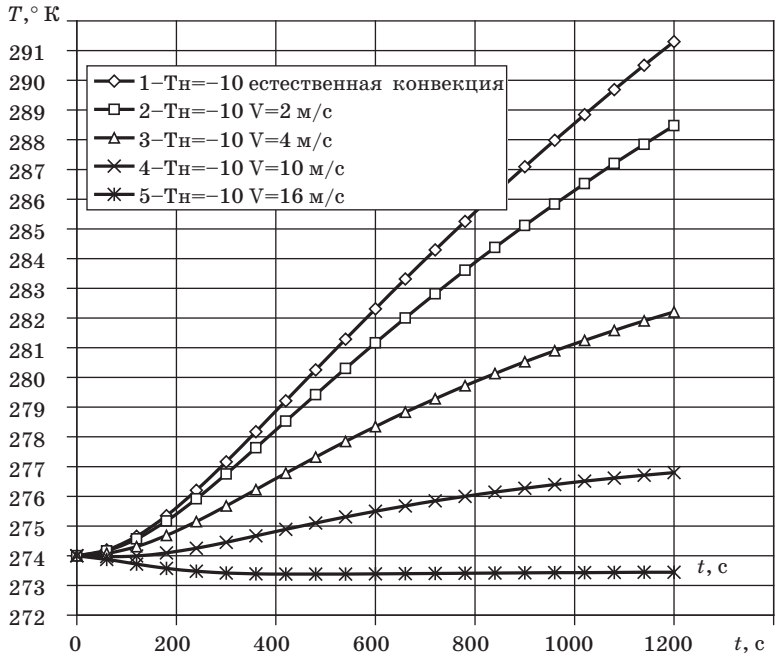


Рис. 7. Динамика нагрева воды в центре трубы греющим кабелем при $T_н = –10$ °С и вариации скорости ветра V

ством задания коэффициента конвекции α, который увеличивается с увеличением силы ветра *V*, как это показано на рис. 5 [8, 9]. Результаты исследований приведены на рис. 6 и 7.

В качестве результатов исследований отметим следующее:

– саморегулирующийся греющий кабель достаточно эффективен и может быть использован для защиты от замерзания воды в наружной части водопровода;

– динамика теплообмена при отсутствии ветра обеспечивает прогрев воды с интенсивностью от 0,002 град/с (при $T_н = –40$ °С) до 0,02 (при $T_н = –1$ °С) град/с;

– наличие ветра, безусловно, снижает противооблединительные способности системы саморегулирующегося греющего кабеля – наружной части водопровода, однако интенсивность теплообмена достаточна для исключения замерзания воды в трубе водопровода;

– рассмотренная система защиты от замерзания воды в наружной части водопровода сохраняет работоспособность в диапазоне температур наружного воздуха до –10 °С, при достаточно сильном ветре до 16 м/с.

Библиографический список

1. Системы антиобледенения: справочник. СПб.: Информационное агентство Norma. 2001. 336 с.

2. *Жуков А. Д.* Системы антиобледенения. М.: НТС «Стройинформ». 2007. 332 с.

3. [Электронный ресурс]. URL: http://alfaopt.alloy.ru/product/sistema-videonablyudeniya/hlle2cf-camoreguliruyushayasya-nagrevatelnaya-lent-9818682/.

4. [Электронный ресурс]. URL: http://zona-tepla.ru.

5. *Акопов В. С.* Математическая модель противообледенительной системы. Завалишинские чтения'15. СПб.: ГУАП, 2015. С. 35–38.

6. ELCUT v.6.0. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2014 г.

7. *Акопов В. С., Салова И. А.* Моделирование противообледенительной системы методом конечных элементов. Завалишинские чтения'16. СПб.: ГУАП, 2016. С. 16–20.

8. [Электронный ресурс]. URL: http://law.rufox.ru/print/25/1200041798.htm.

9. [Электронный ресурс]. URL: http://cad.life/index/rascheti/vazhnyie-parametryi-nekotoryix-materialov-ispolzuemyie-pri-teplovyix-raschetax.html.

УДК 621.3.

Ю. А. Ганьшин
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ШАРООБРАЗНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА

В статье приведены преимущества алгоритма идентификации внешнего магнитного поля шарообразного электромагнитного датчика по сравнению с алгоритмом аппроксимации характеристик внешнего магнитного поля методом конечных элементов. Составлен массив входных данных для проверки алгоритма в виде измеренных характеристик поля. Приведены пункты алгоритма и результат применения алгоритма.

Ключевые слова: *электромагнитный датчик скорости, теория идентификации электромагнитных полей, сферическая система координат, весовые коэффициенты сферических гармоник.*

Yu. A. Ganshin
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

CALCULATION IDENTIFICATION ALGORITHM FOR THE MAGNETIC FIELD OF SPHERICAL ELECTROMAGNETIC SENSOR

In article describes the advantages of an calculation identification algorithm for the magnetic field of spherical electromagnetic sensor as compared with the approximation characteristics of an external magnetic field FEM. Describes an array of source data to test the algorithm in the form of the measured characteristics of the field. Describes the components of the algorithm and the result of applying the algorithm.

Keywords: *electromagnetic transducer of speed, identification theory of electromagnetic fields, spherical coordinate system, weights of spherical harmonics.*

В ряде практических задач электромагнитной совместимости требуется представление о распределении магнитного поля вокруг устройства, содержащего магнитные системы. Расчет полей устройства в современных системах моделирования полей (например, в Agilent HFSS в программной системе ANSYS) выполняется с помощью алгоритма конечных разностей. Такие системы имеют невысокую оперативность из-за выполнения ряда повторяющихся операций, так как требуют учета следующих дополнительных параметров: точной геометрической формы, электрической и магнитной проницаемости, а также электрической проводимости деталей устройства [1]. В статье рассматривается алгоритм идентификации электромагнитного поля как альтернативная методика расчета магнитного поля вокруг шарообразного электромагнитного датчика скорости жидкости. В качестве примера такого датчика можно привести ИЭЛ-2М[2], двухкомпонентный датчик измерителя скорости электропроводящей жидкости [3].

Алгоритм идентификации магнитного поля основан на теории идентификации электромагнитных полей. Идентификацией электромагнитных полей называется определение структуры и параметров математических моделей пространственных электромагнитных полей на основе экспериментальной информации о напряженности поля, снятой на замкнутой базовой поверхности, охватывающей объект исследования (в нашем случае электромагнитный датчик). При этом на характер структуры и распределения токов объекта исследования практически не накладывается никаких ограничений. В отличие от определения структуры магнитного поля вне датчика методом моментов или методом конечных разностей рассматриваемый алгоритм не требует знания геометрических параметров и электромагнитных констант деталей дат-

чика [4]. Рассматриваемый алгоритм позволяет, получив информацию о напряженности магнитного поля датчика на его поверхности радиуса r_0 (совпадающей с базовой), определить характеристики магнитного поля в любой точке вокруг датчика и при этом учесть особенности индивидуального строения конкретного датчика, так как именно с него была получена начальная экспериментальная информация [1]. Если произвести снятие экспериментальной информации в момент, когда электромагнитный измеритель скорости жидкости находится в рабочем состоянии, то фиксируется суммарное поле, обусловленное исследуемым датчиком (первичное поле) и отраженное (или индуцированное) поле от измерительной установки (вторичное поле), то есть при идентификации учитывается влияние внешних условий. С учетом особенностей магнитного поля конкретного датчика и внешних условий во время работы алгоритм повышает точность идентификации характеристик магнитного поля датчика. Расчет выполняется в сферических координатах r, ϑ, φ [5].

Матрицу входных данных H_r (1) для расчета магнитного поля составляют дискретные измерения радиальной проекции напряженности магнитного поля, экспериментально прозондированные на всей поверхности датчика.

$$H_r = \begin{bmatrix} H_{r1,1} \dots H_{r1,N_\vartheta} \\ \dots \\ H_{rN_\varphi,1} \dots H_{rN_\varphi,N_\vartheta} \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где N_φ – количество значений по координате φ;

N_θ – количество значений по координате θ.

Измерения по θ проводились в диапазоне от 0 до 180°, шаг 2°. Измерения по θ проводились в диапазоне от 0 до 178°, шаг 2°.

Численный алгоритм идентификации магнитного поля шарообразного объекта состоит из трех частей.

1. Необходимо получить двумерный массив вспомогательных постоянных интегрирования A_{nm} (2), определяемый матрицей входных данных для всех комбинаций n и m, где n, m – разделительные коэффициенты при решении уравнения Лапласа методом разделения переменных [4].

$$A_{nm} = \frac{2n+1}{4\pi}\frac{(n-m)!}{(n+m)!}\times$$

$$\times\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} H_r(\vartheta,\varphi) P_n^m(\cos\vartheta) e^{im\varphi} \sin\vartheta d\vartheta d\varphi, \qquad (2)$$

где P_n^m – присоединенная функция Лежандра.

2. Необходимо получить группу двумерных массивов весовых коэффициентов a_{nm}, задействованных в расчете сферических гармоник, определяемых выражением

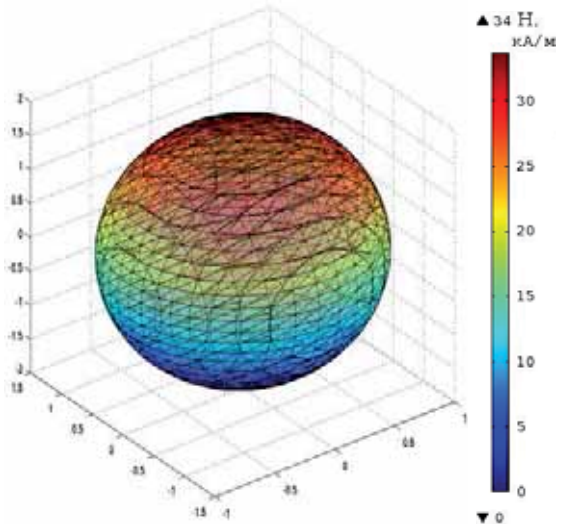


Рис. 1. Распределение магнитного поля вокруг шарообразного электромагнитного датчика

$$a_{nm} = \frac{A_{nm}}{n+1} r_0^{n+1}. \qquad (3)$$

3. Для нахождения магнитного поля заданной точки необходимо подставить найденные весовые коэффициенты в выражения для расчета проекций вектора напряженности магнитного поля датчика H (4) при заданных значениях координат точки. Если координаты были заданы не в сферической системе, то требуется осуществить их перевод в сферическую систему координат.

$$\begin{cases} H_r(r_0) = \sum_{n=0}^{N}\sum_{m=-n}^{n} a_{nm}(n+1) r_0^{-n-2} P_n^m(\cos\vartheta) e^{im\varphi}, \\ H_\vartheta(r_0) = -\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=-n}^{n} a_{nm} r_0^{-n-2} \frac{d}{d\vartheta} P_n^m(\cos\vartheta) e^{im\varphi}, \\ H_\varphi(r_0) = -\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=-n}^{n} a_{nm} r_0^{-n-2} i\frac{m}{\sin\vartheta} P_n^m(\cos\vartheta) e^{im\varphi}, \end{cases} \qquad (4)$$

где N – количество сферических гармоник.

В качестве результата выполнения алгоритма идентификации магнитного поля шарообразного электромагнитного датчика на рис. 1 изображено распределение магнитного поля вокруг датчика на расстоянии 0,05 м.

Библиографический список

1. *Ганьшин Ю. А.* Принципы расширения функциональных возможностей и повышения точности многокомпонентных электромагнитных датчиков измерителя скорости судна / Заявка на конкурс РФФИ «мол_а» [Электронный ресурс]. URL: https://kias.rfbr.ru/Application.aspx?id= 13808743.

2. *Саранчин А. И., Полковник В. Ф., Завьялов В. В.* Индукционный электронный лаг ИЭЛ-2М: учеб. пособие. Владивосток: 2003, 40 с.

3. Пат. 2399059 РФ, МПК G01 P5/08. Двухкомпонентный датчик измерителя скорости электропроводящей жидкости / Ганьшин Ю. А., Лавров В. Я. СПб.: ГУАП, 2010.

4. *Кирпанев А. В., Лавров В. Я.* Электромагнитное поле: теория идентификации и ее применение: учеб. пособие для вузов. Изд. 3-е. М.: Вузовская книга, 2012. 278 с.

5. *Ганьшин Ю. А.* Методическое обеспечение и средства электромагнитного контроля составляющих скорости жидких полупроводящих сред: диссертация. СПб.: ГУАП, 2011. 133 с.

УДК 533.9:537.52

А. В. Герасимов
доктор технических наук, доцент
Казанский национальный исследовательский технологический университет

А. П. Кирпичников
доктор физико-математических наук, профессор
Казанский национальный исследовательский технологический университет

Ф. Р. Сабирова
аспирант
Казанский национальный исследовательский технологический университет

СТРУКТУРА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА И МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМУМОВ ЕГО НЕКОТОРЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В статье проведен анализ распределений проводимости, температуры, плотности тока и удельной мощности тепловыделения в высокочастотном индукционном разряде. Установлен закон сгущения максимумов этих величин по радиальной координате.

Ключевые слова: *высокочастотный индукционный разряд, проводимость, температура.*

A. V. Gerasimov
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
Kazan National Research Technological University

A. P. Kirpichnikov
Dr. Sc., Phys. and Math., Professor
Kazan National Research Technological University

F. R. Sabirova
PhD Student
Kazan National Research Technological University

STRUCTURE OF HIGH-FREQUENCY INDUCTION DISCHARGE AND LOCATION ITS MAXIMUM SOME ELECTROPHYSICAL PARAMETERS

The article analyzes the distribution of conductivity, temperature, current density and power density of heat in the high-frequency induction discharge established law thickening peaks of these values along the radial coordinate.

Keywords: *the high-frequency induction discharge, conductivity, temperature.*

В электроплазменных процессах, использующих плазму высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда, зона разряда является основной технологической зоной. Информация о распределении основных параметров разряда (проводимость, температура, плотность тока, удельная мощность тепловыделения) и месторасположении их максимальных значений дает возможность определить оптимальные условия нагрева исходного материала и обеспечить высокое качество получаемого продукта.

Поэтому в данной работе предлагается следующая методика выявления расположения максимумов таких величин, как плотность тока и удельная мощность тепловыделения.

1. Зоны максимума электропроводности, плотности тока и мощности тепловыделения в высокочастотном индукционном разряде.

В [1–7] была разработана полуэмпирическая модель для расчета электрических, магнитных и тепловых параметров плазмы высокочастотного индукционного разряда, основанная на решении двухмерной системы уравнений Максвелла, записанной для цилиндрической системы координат.

Часть из этих расчетов, а именно радиальные распределения удельной электропроводности σ, температуры, плотности тока j и удельной мощности тепловыделения W для различных сечений газоразрядной камеры, представлена на рис. 1–6.

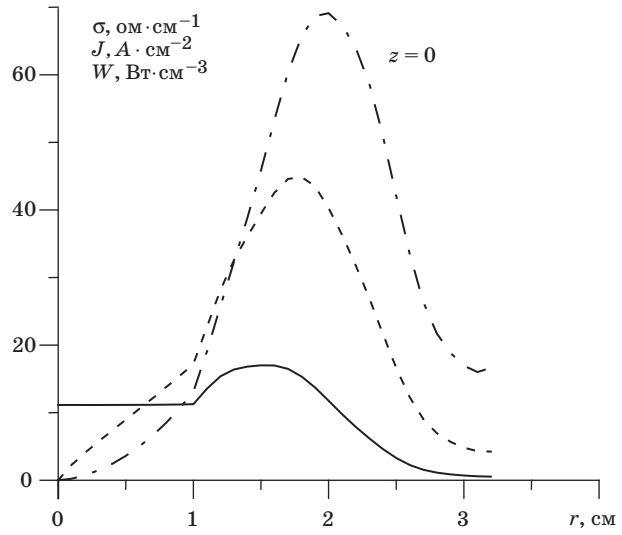


Рис. 1

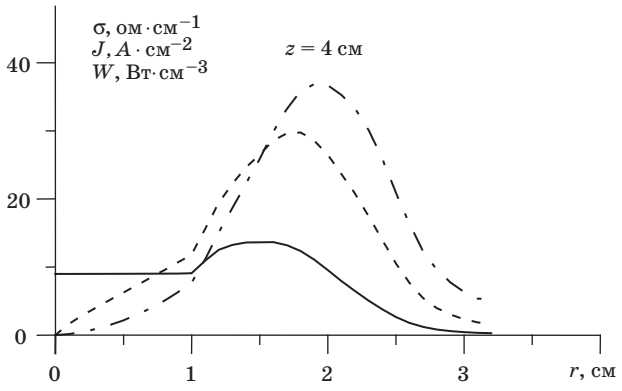


Рис. 2

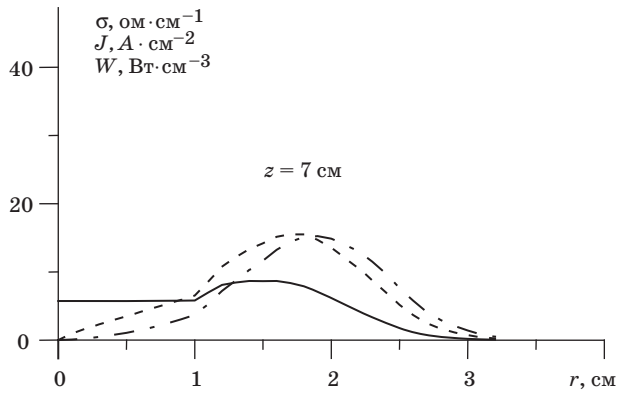


Рис. 3

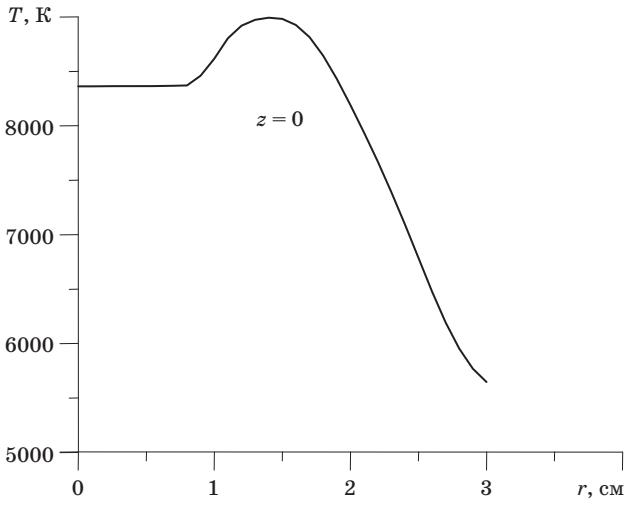


Рис. 4

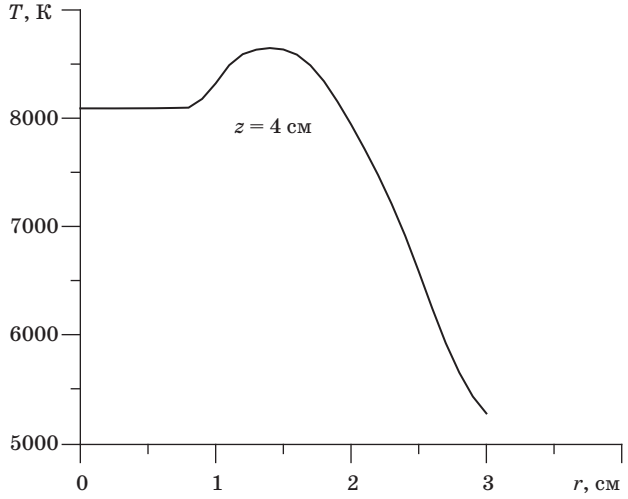


Рис. 5

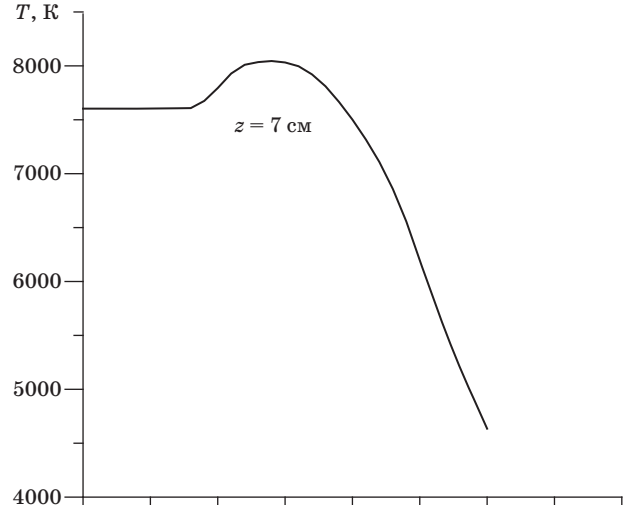


Рис. 6

Как видно из рис. 1–6, плотность тока j и удельная мощность тепловыделения W, как и температура, и электропроводность, имеют максимумы. Однако они несколько смещены относительно максимума температуры и электропроводности в сторону стенок камеры.

Это дает основание высказать предположение о том, что внутри плазмоида высокочастотного индукционного разряда для каждого из его поперечных сечений выполнено неравенство

$$r_1 < r_2 < r_3, \qquad (1)$$

в котором $r_1 = r(\sigma_{max})$, $r_2 = r(j_{\varphi max})$ и $r_3 = r(W_{max})$ – радиальные координаты, соответствующие максимумам стоящих в скобках физических величин.

В этих соотношениях: σ – проводимость в разряде, $j = \sigma E_\varphi$ – плотность вихревого тока, E_φ – напряженность азимутального электрического поля и $W = \frac{1}{2}\sigma E_\varphi^2$ – вкладываемая в разряд мощность на единицу объема.

Неравенство (1) можно обосновать аналитически следующим образом.

Пусть $\sigma(r,z)$, $j_\varphi(r,z) = \sigma E_\varphi$ и $W = \frac{1}{2}\sigma E_\varphi^2$ есть функции, которые в каждом фиксированном сечении плазмоида достигают своих максимальных значений на отрезке $0 \le r \le R$ только один раз. Тогда можно строго доказать, что при этом

$$r(\sigma_{max}) < r(j_{\varphi max}) < r(W_{max}).$$

В самом деле, очевидно, что в точке $r_1 = r(\sigma_{max})$

$$\left.\frac{\partial\sigma(r)}{\partial r}\right|_{r_1} = 0,$$

так что

$$\frac{\partial\sigma(r)}{\partial r} > 0 \text{ при } r < r_1$$

и

$$\frac{\partial\sigma(r)}{\partial r} < 0 \text{ при } r > r_1.$$

Тогда в точке $r_2 = r(j_{\varphi max})$ имеем

$$\left.\frac{\partial(\sigma E_\varphi)}{\partial r}\right|_{r_2} = \left.\frac{\partial\sigma}{\partial r}\right|_{r_2} E_\varphi(r_2) + \sigma(r_2)\left.\frac{\partial E_\varphi}{\partial r}\right|_{r_2} = 0.$$

Но, поскольку во всем объеме плазмоида величины $E_\varphi(r), \sigma(r), \frac{\partial E_\varphi(r)}{\partial r}$ в любом случае неотрицательны (например, [2]), то, следовательно, в точке r_2

$$\left.\frac{\partial\sigma}{\partial r}\right|_{r_2} = -\frac{\sigma(r_2)}{E_\varphi(r_2)}\left.\frac{\partial E_\varphi}{\partial r}\right|_{r_2} < 0,$$

а это, в соответствии с вышеуказанным, означает, что точка $r_2 = r(j_{\varphi max})$ находится на нисходящем участке функции $\sigma(r)$, то есть на отрезке $r_1 < r < R$ и, следовательно, $r_2 > r_1$.

Точно так же в точке $r_3 = r(W_{max})$ имеем

$$\left.\frac{\partial(\sigma E_\varphi^2)}{\partial r}\right|_{r_3} = \left.\frac{\partial(\sigma E_\varphi)}{\partial r}\right|_{r_3} E_\varphi(r_3) + \sigma(r_3)E_\varphi(r_3)\left.\frac{\partial E_\varphi}{\partial r}\right|_{r_3} = 0.$$

Значит,

$$\left.\frac{\partial(\sigma E_\varphi)}{\partial r}\right|_{r_3} = -\sigma(r_3)\left.\frac{\partial E_\varphi}{\partial r}\right|_{r_3} < 0$$

и, следовательно, $r_3 > r_2$. В сумме же мы как раз и получаем искомое неравенство (1):

$$r_1 < r_2 < r_3,$$

которое и требовалось доказать.

Заметим, что с точки зрения физики полученный результат не является, конечно, неожиданным: джоулево тепло, выделяющееся в скин-слое, отводится во внешнюю область разряда всеми возможными механизмами теплообмена, включая как его конвективную, так и кондуктивную составляющие, в то время как во внутреннюю (по отношению к скин-слою) область разряда – в основном лишь механизмом кондуктивного переноса тепла.

Укажем далее, что, действуя точно таким же образом, можно доказать и более общий результат – справедливость неравенства

$$r_1 < r_2 < \ldots < r_i \ldots < r_n, \qquad (2)$$

в котором $r_i = r\left[\left(\sigma E_\varphi^{i-1}\right)_{max}\right]$, а $i = 1,2,\ldots n$, где n – сколь угодно большое натуральное число. При этом, как легко видеть, неравенство (1) в действительности является лишь частным случаем более общей зависимости (2).

Таким образом, внутри ВЧИ разряда существует семейство коаксиальных цилиндрических поверхностей, соответствующих максимумам величин σE_φ^{i-1}, и при этом, например, в условиях локального термодинамического равновесия (ЛТР) принадлежащая семейству поверхностей (2) поверхность минимального радиуса $r_1 = r(\sigma_{max})$ в силу однозначной связи в этом случае температуры T с проводимостью в разряде $\sigma = \sigma(T)$ является одновременно также и поверхностью, отвечающей максимальной температуре внутри плазмоида $T_{max} = T(r_1)$.

2. Определение закона сгущения точек r_i, соответствующих точкам максимумов величин σE_φ^{i-1} на оси r по направлению к периферии плазмоида.

Таблица 1

Z, см	0	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta_{1эмп}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$\Delta_{1расч}$	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
$\Delta_{2эмп}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
$\Delta_{2расч}$	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16

Рассмотрим функцию вида

$$y = \sigma E_{\varphi}^{i-1}.$$

Изменение величины E_φ аппроксимируем прямой линией

$$E_\varphi = a \cdot r^{i-1},$$

а величину σ в виде

$$\sigma = \sigma_{max} \cdot e^{-\left(\frac{r-r_0}{\Delta r}\right)^2}.$$

Тогда

$$y = a \cdot r^{i-1} \cdot \sigma_{max} \cdot e^{-\left(\frac{r-r_0}{\Delta r}\right)^2}.$$

В этом случае с точки зрения математики вопрос о максимумах величин σE_{φ}^{i-1} как функции радиальной координаты r сводится к вопросу о нахождении максимумов функции

$$y = a \cdot r^{i-1} \cdot \sigma_{max} \cdot e^{-\left(\frac{r-r_0}{\Delta r}\right)^2},$$

который можно решить стандартными методами прикладного анализа. В самом деле, в точке максимума $f = f_{max}$ имеем

$$\left.\frac{\partial f}{\partial r}\right|_{f_{max}} = 0.$$

Откуда для точки $r^* = r(f_{max})$ следует соотношение

$$\frac{\partial\left(ar^{i-1}e^{-\left(\frac{r-r_0}{\Delta r}\right)^2}\right)}{\partial r} =$$

$$= a(i-1)r^{i-2}e^{-\left(\frac{r-r_0}{\Delta r}\right)^2} - a \cdot r^{i-1} \cdot \frac{2(r-r_0)}{\Delta r^2} e^{-\left(\frac{r-r_0}{\Delta r}\right)^2} = 0$$

или

$$r^2 - r \cdot r_0 - (i-1) - \frac{(\Delta r)^2}{2} = 0.$$

Решение данного квадратного уравнения есть

$$r_{1,2} = \frac{r_0 \pm r_0\sqrt{1 + 2(i-1)\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2}}{2}.$$

Из физических соображений ясно, что нашему случаю соответствует знак плюс, и тогда имеем

$$r^* = \frac{r_0}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2(i-1)\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2}\right).$$

При $i = i + 1$

$$\tilde{r}^* = \frac{r_0}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2i\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2}\right).$$

Тогда

$$\Delta = \tilde{r}^* - r^* =$$

$$= \frac{r_0}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2i\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2}\right) - \frac{r_0}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2(i-1)\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2}\right) =$$

$$= \frac{\sqrt{1 + 2i\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2} - \sqrt{1 + 2(i-1)\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^2}}{2}.$$

При $i \to \infty$ $\tilde{r}^*(i) - r^*(i-1) \to 0$ или $\tilde{r}^* \approx r^*$, то есть точки, соответствующие максимуму, должны сгущаться.

Оценим величину этого сгущения.

Методика оценки проиллюстрирована на рис. 7.

На графике выбирается точка, соответствующая максимуму величины проводимости σ. В нашем случае $\sigma_{max} = 15{,}0$. Радиальная координата, соответствующая σ_{max} $r_0 = 1{,}5$ см. Затем определяется стандартная полуширина экспоненциальной кривой Δr, то есть в этом месте величина σ должна уменьшиться в e раз от σ_{max}. В нашем случае $\Delta r = 0{,}8$ см. Тогда $\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{0{,}8}{1{,}5} = 0{,}53$.

Оценим величины Δ_1 и Δ_2.

$$\Delta_1 = 1{,}5 \cdot \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot 1 \cdot (0{,}53)^2} - 1}{2} = 0{,}19,$$

$$\Delta_2 = 1{,}5 \cdot \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot 2 \cdot (0{,}53)^2} - \sqrt{1 + 2 \cdot 1 \cdot (0{,}53)^2}}{2} = 0{,}16.$$

Аналогичные вычисления производятся для других сечений.

Результаты вычислений сведены в табл. 1. В этой же таблице приведены величины Δ_1 и Δ_2, полученные непосредственно с графиков.

Как видно, наилучшее совпадение эмпирических данных с расчетными наблюдается для первых четырех внутренних сечений плазмоида вниз по потоку, что можно объяснить более точной аппроксимацией амплитуды азимутального электрического поля для этой области плазменного сгустка.

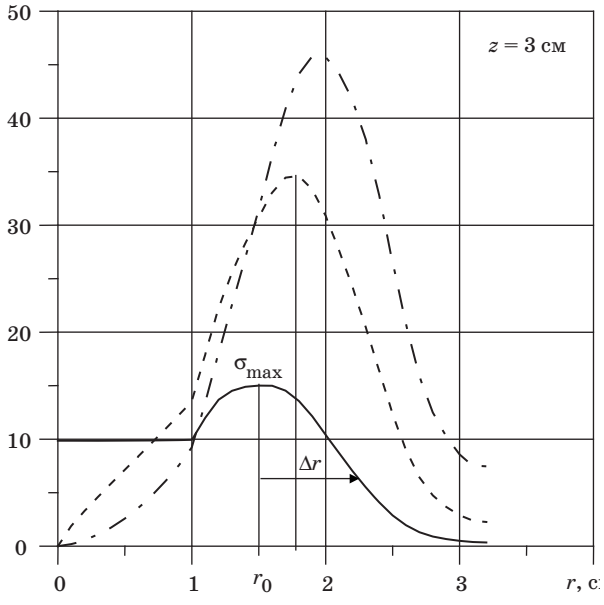


Рис. 7

Результаты, представленные в настоящей работе, могут быть полезны достаточно широкому кругу специалистов в области физики и техники высокочастотного индукционного разряда, а также разработки и оптимизации различного рода энергетических установок, основанных на принципе индукционного нагрева проводящих сред.

Библиографический список

9. *Кирпичников А. П.* Предельные соотношения для ВЧ индукционного разряда // Изв. вузов. Физика, 1993. № 1. С. 56–60.

10. *Кирпичников А. П.* О предельных соотношениях системы уравнений, описывающих квазистационарное электромагнитное поле ВЧ индукционного разряда // Изв. вузов. Физика. 1993. № 11. С. 102–105.

11. *Кирпичников А. П.* О структуре квазистационарного электромагнитного поля ВЧ индукционного разряда при атмосферном давлении // Изв. вузов. Физика. 1994. № 2. С. 77–81.

12. *Кирпичников А. П.* Структура квазистационарного электромагнитного поля высокочастотного индукционного разряда вблизи плазменного сгустка // ТВТ. 1995. Т. 33. № 1. С. 139–140.

13. *Кирпичников А. П.* О структуре высокочастотного индукционного разряда при атмосферном давлении вблизи оси плазменного сгустка // ТВТ. 1996. Т. 34. № 6. С. 989–990.

14. *Кирпичников А. П.* О модели Томсона ВЧИ разряда конечной длины // Изв. вузов. Физика. 1998. № 2. С. 125–131.

15. *Герасимов А. В.* Электрофизические и тепловые параметры термической плазмы в высокочастотном индукционном разряде // Изв. вузов. Физика. 2004. № 7. С. 65–69.

16. *Рыкалин Н. Н.*, *Сорокин Л. М.* Металлургические ВЧ-плазмотроны. Электро- и газодинамика. М.: Наука, 1987. 161 с.

УДК 621.391.037.372

В. Э. Гуревич
кандидат технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ

Найдены аналитические и расчетно-графические представления законов распределения доплеровского частотного сдвига при равномерном и (или) усеченном нормальном распределении полной скорости и бортового азимута мобильного источника радиоизлучения. Представленные результаты могут быть использованы для уменьшения влияния сдвига частоты на качество передачи информации, а также при разработке и совершенствовании цифровых радиосистем с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM).

Ключевые слова: *мобильный источник радиоизлучения, радиальная скорость, бортовой азимут, доплеровский сдвиг частоты, законы распределения, OFDM.*

V. E. Gurevich
PhD, Tech., Professor
The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications

STATISTICAL CHARACTERISTICS DOPPLER FREQUENCY SHIFT

Analytical and settlement-graphic representations of laws of distribution Doppler frequency shift are found at uniform and (or) the truncated normal distribution of full speed and an onboard azimuth of a mobile source of a radio emission. The presented results can be used for reduction of influence of frequency shift by quality of information transfer, and also by working out and perfection of digital radio systems with orthogonal frequency multiplexing (OFDM).

Keywords: *a mobile source of a radio emission, radial speed, an onboard azimuth, Doppler frequency shift, distribution laws, OFDM.*

1. Постановка задачи.

Как известно, при движении источника радиоизлучения возникает доплеровский сдвиг частоты

$$F_{\text{д}} = \frac{V_r}{\lambda} = \frac{V\cos\alpha}{\lambda}, \qquad (1)$$

где V и V_r – соответственно полная и радиальная скорости движения источника (например, мобильной абонентской станции АС, рис. 1); λ – длина излучаемой волны, α – бортовой азимут АС относительно направления на базовую станцию БС. Ввиду четности функции $\cos\alpha$ направление отсчета угла α и его знак несущественны.

Если АС приближается к БС, то есть расстояние между ними уменьшается, $V<0$, $V_r<0$, $F_{\text{Д}}<0$, а если АС отдаляется, то $V>0$, $V_r>0$, $F_{\text{Д}}>0$. Частоты сигналов, принимаемых АС или БС, в первом случае увеличиваются, во втором уменьшаются. Тангенциальная составляющая V_τ полной скорости V (рис. 1) на величину доплеровского сдвига частоты непосредственно не влияет и поэтому ниже не рассматривается.

Найдем статистические характеристики доплеровского сдвига, считая, что полная скорость и бортовой азимут абонентской станции суть независимые случайные величины.

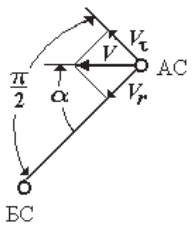


Рис. 1. Взаимное расположение АС и БС

2. Закон распределения функции $y = \cos\alpha$.

Естественно положить, что закон распределения азимута α – равномерный (рис. 2, *а*), с функцией плотности

$$W_\alpha(\alpha) = \begin{cases} 0, \alpha < -\dfrac{\pi}{2}, \\ \dfrac{1}{\pi}, -\dfrac{\pi}{2} \le \alpha \le \dfrac{\pi}{2}, \\ 0, \alpha > \dfrac{\pi}{2}. \end{cases}$$

Найдем закон распределения функции $y = \cos\alpha$, следуя [1]. Производные неоднозначной обратной функции $\alpha(y) = \arccos y$ (рис. 3) в первом и четвертом квадрантах соответственно равны

$$\frac{d\alpha_1}{dy} = \frac{-1}{\sqrt{1-y^2}}, \quad \frac{d\alpha_4}{dy} = \frac{1}{\sqrt{1-y^2}}.$$

Плотность распределения случайной величины y, показанная на рис. 4,

$$W_y(y) = W_\alpha\left[\alpha(y)\right]\left[\left|\frac{d\alpha_1}{dy}\right| + \left|\frac{d\alpha_4}{dy}\right|\right] =$$

$$= \begin{cases} 0, y < 0, \\ \dfrac{2}{\pi\sqrt{1-y^2}}, 0 \le y \le 1, \\ 0, y > 1. \end{cases}$$

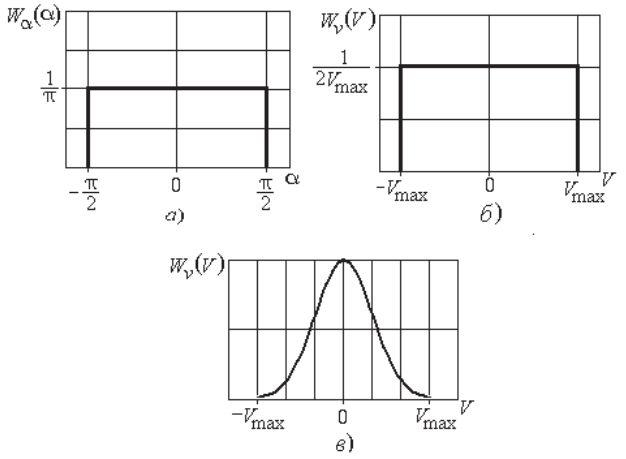


Рис. 2. Плотности распределения азимута (а) и полной скорости (б, в)

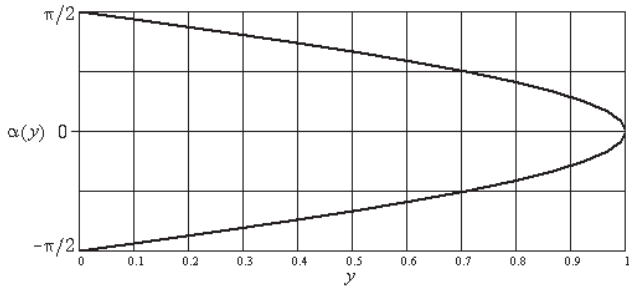


Рис. 3. Функция $\alpha(y)$

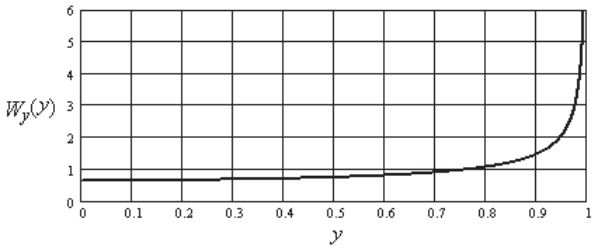


Рис. 4. Плотность распределения случайной величины $y = \cos\alpha$

3. Закон распределения радиальной скорости при равномерных распределениях азимута и полной скорости источника.

Пусть распределение полной скорости V – равномерное (рис. 2, *б*), с функцией плотности

$$W_v(V) = \begin{cases} 0, V < -V_{max}, \\ \dfrac{1}{2V_{max}}, -V_{max} \le V \le V_{max}, \\ 0, V > V_{max}. \end{cases}$$

Тогда двумерная плотность распределения системы независимых случайных величин V и y

$$W(V,y) = W_v(V)W_y(y) =$$

$$= \begin{cases} 0, V < -V_{max} \text{ или } y < 0, \\ \dfrac{1}{\pi V_{max}\sqrt{1-y^2}}, -V_{max} \le V \le V_{max}, -1 \le y \le 1, \\ 0, V > V_{max} \text{ или } y > 1. \end{cases} \quad (2)$$

Для отыскания закона распределения радиальной скорости V_r введем новые переменные: $u = f_1(V, y)$, $z = f_2(V, y)$. Как известно, при функциональном преобразовании системы двух случайных величин двумерная плотность нового распределения[1]

$$W_f(u,z) = W\left[V(u,z), y(u,z)\right]\left|\frac{\partial(V,y)}{\partial(u,z)}\right|, \quad (3)$$

где якобиан обратного преобразования может быть выражен через якобиан прямого преобразования:

$$\frac{\partial(V,y)}{\partial(u,z)} = \frac{1}{\dfrac{\partial(u,z)}{\partial(V,y)}}.$$

Положим, $u = f_1(V,y) = V$ и $z = f_2(V,y) = Vy$. Тогда каждой паре значений u; z однозначно соответствует пара $V = u$ и $y = z/u$, то есть обратное преобразование – однозначное, причем[2]

[1] В данном случае символ $|\cdot|$ – знак модуля.

[2] В данном случае символ $|\cdot|$ – знак детерминанта.

$$\frac{\partial(u,z)}{\partial(V,u)}=\begin{vmatrix}\frac{\partial u}{\partial V}&\frac{\partial u}{\partial y}\\ \frac{\partial z}{\partial V}&\frac{\partial z}{\partial y}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}1&0\\ \frac{\partial z}{\partial V}&\frac{\partial z}{\partial y}\end{vmatrix}=\frac{\partial z}{\partial y}=V.$$

Подставляя это значение в (3), получаем

$$W_f(u,z)=\frac{W\left[V(u,z),y(u,z)\right]}{|V|}=\frac{W\left(u,\frac{z}{u}\right)}{|u|}.$$

Одномерная плотность случайной величины $z = Vy$ (радиальной скорости АС) с учетом формул (2), (3), (4) и того, что $dV = du$, равна

$$W_z(z)=\int_{-V_{\max}}^{V_{\max}}W\left(u,\frac{z}{u}\right)\frac{du}{|u|}=\frac{1}{\pi V_{\max}}\int_{-V_{\max}}^{V_{\max}}\frac{du}{\sqrt{u^2-z^2}}.$$

Тогда, согласно [2, ф-ла 260.01],

$$W_z(z)=\frac{1}{\pi V_{\max}}\ln\left|u+\sqrt{u^2-z^2}\right|\Big|_{-V_{\max}}^{V_{\max}}=$$

$$=\frac{1}{\pi V_{\max}}\ln\frac{V_{\max}+\sqrt{V_{\max}^2-z^2}}{\left|-V_{\max}+\sqrt{V_{\max}^2-z^2}\right|}. \qquad (5)$$

График функции $W_z(z)$ для случая, когда $V_{\max} = 130$ км/ч, представлен на рис. 5.

4. Закон распределения радиальной скорости при равномерном распределении азимута и усеченном нормальном распределении полной скорости источника.

Пусть распределение полной скорости – усеченное нормальное (рис. 2, *в*) с функцией плотности

$$W_V(V)=\begin{cases}0,\ V<-V_{\max},\\ \frac{1}{A\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left\{\frac{-V^2}{2\sigma^2}\right\},-V_{\max}\le V\le V_{\max},\\ 0,\ V>V_{\max},\end{cases}$$

нулевым средним и дисперсией σ^2. Здесь нормирующий коэффициент

$$A=\frac{1}{2\pi}\left(\int_{-\infty}^{V_{\max}/\sigma}\exp\left(\frac{-V^2}{2}\right)-\int_{-\infty}^{-V_{\max}/\sigma}\exp\left(\frac{-V^2}{2}\right)\right).$$

Если принять, что $V_{\max} = 3\sigma$, то $A = 0{,}997$.

Функция плотности двумерного совместного распределения

$$W(V,y)=W_V(V)W_y(y)=$$

$$=\frac{2}{A\sigma\sqrt{2\pi^3\left(1-y^2\right)}}\exp\left\{\frac{-V^2}{2\sigma^2}\right\}.$$

Положим, как и ранее, $z = f_2(V,y) = Vy$, но, в отличие от ранее принятого, $u = f_1(V,y) = y$; тогда $V = z/y = z/u$, и якобиан прямого преобразования

$$\frac{\partial(u,z)}{\partial(V,u)}=\begin{vmatrix}\frac{\partial u}{\partial V}&\frac{\partial u}{\partial y}\\ \frac{\partial z}{\partial V}&\frac{\partial z}{\partial y}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}0&1\\ \frac{\partial z}{\partial V}&\frac{\partial z}{\partial y}\end{vmatrix}=\frac{-\partial z}{\partial V}=-y=-u.$$

Двумерная плотность преобразованной системы переменных в данном случае

$$W_f(u,z)=\frac{W\left[V(u,z),y(u,z)\right]}{|-u|}=\frac{W\left(\frac{z}{u},u\right)}{|-u|}.$$

Одномерная плотность распределения радиальной скорости z имеет вид

$$W_z(z)=\frac{2}{A\sigma\sqrt{2\pi^3}}\int_0^1\frac{\exp\left\{\frac{-z^2}{2u^2\sigma^2}\right\}}{u\sqrt{1-u^2}}du. \qquad (6)$$

Найти аналитическое выражение для этого интеграла не удается. Численно-графическое решение для примера, когда $V_{\max} = 130$ км/ч, полученное с помощью продукта Mathcad, представлено на рис. 6. Из него видно, что закон распределения радиальной скорости близок к экспоненциальному. Проверка условия нормировки дает удовлетворительный результат:

$$\int_{-130}^{130}W_z(z)dz=1{,}001\cong 1.$$

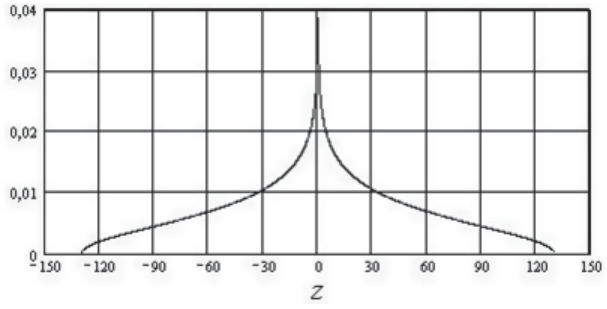


Рис. 5. Плотность распределения радиальной скорости ($V_{\max} = 130$ км/ч)

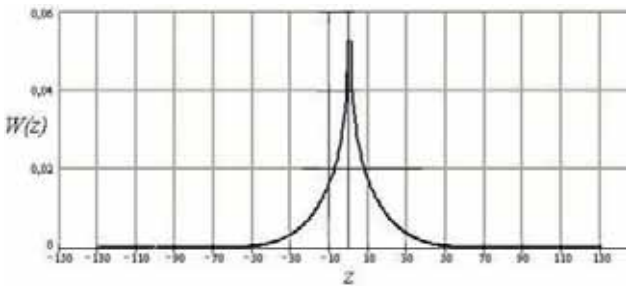


Рис. 6. Плотность распределения радиальной скорости ($V_{\max} = 130$ км/ч, $\sigma = 43{,}3$ км/ч)

5. Законы распределения доплеровского сдвига.

Возвращаясь к исходной формуле (1), найдем по общему правилу плотность распределения доплеровского сдвига частоты $F_Д$, линейно зависящего от радиальной скорости z:

$$W_F\left(F_Д\right)=W_z\left[z(F_Д)\right]\left|\frac{dz}{dF_Д}\right|=\lambda W_z\left(\lambda F_Д\right).$$

При равномерных распределениях азимута и полной скорости, согласно (5),

$$W_F\left(F_Д\right)=\begin{cases}\dfrac{3600\lambda}{\pi V_{\max}}\ln\dfrac{V_{\max}+\sqrt{V_{\max}^2-\left(3600\lambda F_Д\right)^2}}{\left|-V_{\max}+\sqrt{V_{\max}^2-\left(3600\lambda F_Д\right)^2}\right|}, \\ 3600\lambda\left|F_Д\right|\le V_{\max}, \\ 0,\ 3600\lambda\left|F_Д\right|>V_{\max}.\end{cases} \quad (7)$$

При равномерном распределении азимута и усеченном нормальном распределении полной скорости, согласно (6),

$$W_F\left(F_Д\right)=$$

$$=\begin{cases}\dfrac{2}{A\sigma_F\sqrt{2\pi^3}}\displaystyle\int_0^1\frac{\exp\left\{\dfrac{-F_Д^2}{2u^2\sigma_F^2}\right\}}{u\sqrt{1-u^2}}du,\ 3600\lambda\left|F_Д\right|\le V_{\max}, \\ 0,\ 3600\lambda\left|F_Д\right|>V_{\max},\end{cases} \quad (8)$$

где $\sigma_F=\sigma/(3600\lambda)$.

В обоих рассмотренных случаях максимально возможный доплеровский сдвиг $F_{Д\max}=\pm V_{\max}/(3600l)$. Здесь, а также в (7), (8) длина волны l выражена в километрах, полная скорость источника V и ее среднеквадратическое отклонение σ – в километрах/час, доплеровский сдвиг $F_Д$ и его среднеквадратическое отклонение σ_F – в герцах. Графически функции плотности (7), (8) распределения доплеровского сдвига отличаются от кривых, представленных на рис. 5 и рис. 6, только масштабом, зависящим от длины волны l.

Найденные законы распределения доплеровского сдвига частоты сигнала, принимаемого от мобильного источника, позволяют оценить реальную помехоустойчивость радиоканала и принять необходимые меры для уменьшения влияния доплеровского эффекта на качество связи.

Библиографический список

1. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники, кн. 1. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

2. *Двайт Г. Б.* Таблицы интегралов и другие математические формулы: пер. с англ. Н. В. Леви, под ред. К. А. Семендяева. М.: Наука, 1973. 228 с.

УДК.62-791

***В. Г. Дружинин*[1]**
ведущий конструктор

***С. С. Кавтрев*[2]**
ведущий конструктор

***А. К. Рыбакова*[3]**
конструктор 2-й категории

***М. Н. Белов*[4]**
начальник лаборатории
[1,2,3,4]Государственный научный центр РФ Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК)

ВАКУУММЕТР КОМБИНИРОВАННЫЙ ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ

В данной статье предложена концепция широкодиапазонного комбинированного вакуумметра, разработанного с применением отечественной элементной базы. Показан вариант конструкции комбинированного элемента чувствительного. Рассмотрены способы аппроксимации данных, получаемых при работе элементов чувствительных. Приведены результаты экспериментальных исследований. Данная аппаратура предполагается к использованию в космической отрасли и в промышленности.

Ключевые слова: *вакуумметр, измерение давления, вакуум.*

WIDE RANGE COMBINED VACUUM GAUGE

***V. G. Druzhinin*[1], *S. S. Kavtrev*[2], *A. K. Rybakova*[3], *M. N. Belov*[4]**
Leading Designer, Leading Designer, Designer of the 2nd Category, The Head of the Laboratory
[1,2,3,4]The State Scientific Center of the Russian Federation The Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC)

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC). In this paper, the concept of a wide-range combined vacuum gauge, developed taking into account the domestic element base, is proposed. Method for approximating the data of sensitive elements is show. The results of experimental studies are presented. This equipment is intended for use in the space industry and in the production.

Keywords: *vacuum gauge, pressure measurement, vacuum.*

Введение

Вакуумная техника находит применение в электронной, ядерной и космической отраслях и является важной составляющей высоких технологий, которые определяют развитие современного производства. В фундаментальных научных исследованиях в области физики, химии, биологии и медицины часто используют вакуум в качестве рабочей среды. Вакуумная техника является важной частью фундамента для укрепления обороноспособности страны и развития технологий различного назначения.

В технологических вакуумных установках обычно используется большое количество типов вакуумметров, работающих в различных диапазонах давления. В последнее время зарубежные фирмы начали выпускать комбинированные вакуумметры, в которых данные о работе нескольких вакуумметров обрабатываются контроллером так, что пользователь работает с одним вакуумметром. Наша промышленность пока не выпускает таких приборов, что ставит вопрос о необходимости импортозамещения и обеспечения возможности экспорта.

Комбинированные вакуумметры, выпускаемые промышленностью, имеют ряд недостатков. Основными из них являются недостаточно широкий диапазон измерения и плохие метрологические характеристики. Они непригодны для ра-

боты в сверхвысоковакуумном технологическом оборудовании и в космосе.

В комбинированных вакуумметрах используют комбинации теплоэлектрических, механических и инверсно-магнетронных вакуумметров.

Работы по созданию аппаратуры, применяемой для контроля давления при решении различных задач, получили развитие в ЦНИИ РТК с начала 70-х годов. В настоящее время идет активная работа по разработке комбинированных средств контроля давления. Основным направлением разработки средств контроля давления является создание аппаратуры с возможностью работы в космическом пространстве – как в открытом космосе, так и в герметичных и негерметичных отсеках космических аппаратов [1, 2].

Прототип широкодиапазонного комбинированного элемента чувствительного

Основной идеей является разработка прототипа широкодиапазонного вакуумметра с возможностью его доработки как для промышленности, так и для космической отрасли. Основные доработки будут касаться блока электроники и блока вторичной обработки сигналов с элементов чувствительных.

Для аппаратуры контроля давления выставляются следующие технические требования:

– диапазон измерений от 10^5до 10^{-5} Па;

– диапазон рабочих температур от –50 до 50° С;

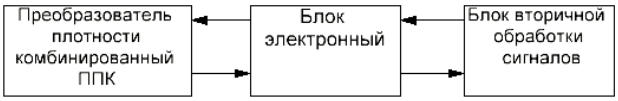


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры контроля давления

– возможность подключения к персональному компьютеру;

– неопределенность измерений во всем диапазоне давлений не более 30%.

Зарубежным аналогом широкодиапазонного вакуумметра является вакуумметр СС-10 Telavac. Недостатками данного вакуумметра являются нестабильность его работы в момент переключения между режимами измерения, а также невозможность его применения в различных климатических условиях. Его основным преимуществом является моноблочность и возможность работы с персональным компьютером и сохранением данных на нем.

На рис. 1 показана структурная схема аппаратуры контроля давления. Основным элементом является преобразователь плотности комбинированный (ППК). В его состав входят несколько элементов чувствительных. За основу взят инверсно-магнетронный элемент чувствительный, рабочий диапазон от 10^{-5} до 10^{-1} Па. Он комбинируется с термопарным элементом чувствительным, рабочий диапазон от 10^0 до 10^3 Па, и тензорезистивным элементом чувствительным, рабочий диапазон которого 10^3 до 10^5 Па. На рис. 2 приведена схема ППК.

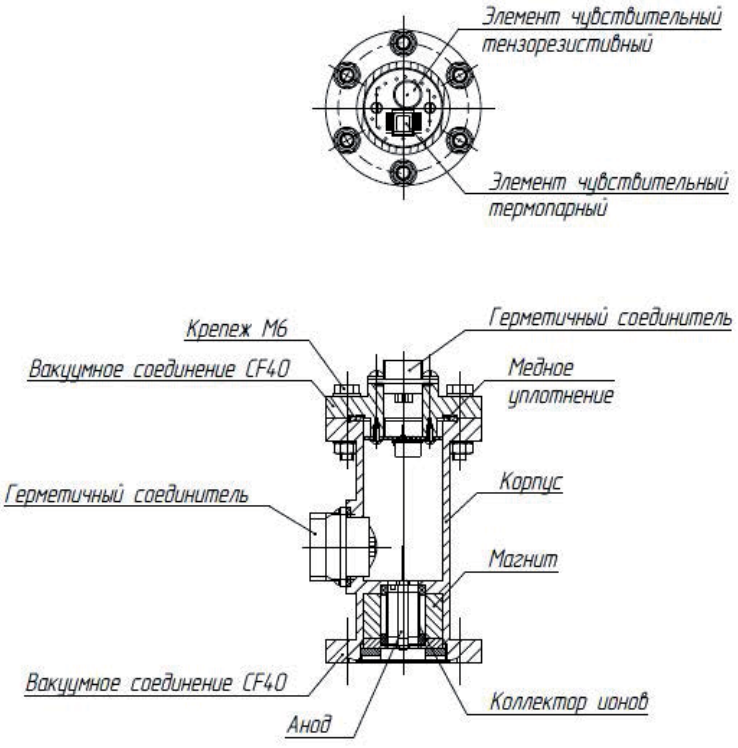


Рис. 2. Схема преобразователя плотности комбинированного

В данном случае ППК является элементом чувствительным, блок электронный – блок формирования и приема сигналов от ППК, блок вторичной обработки сигналов – блок формирования выходных данных для пользователя.

Часть блока вторичной обработки сигналов будет реализована в качестве программного продукта, что позволит применять современные способы обработки информации при работе вакуумметра и вывода конечных данных для пользователя.

Так, градуировочные характеристики термопарного и инверсно-магнетронного элемента чувствительного являются нелинейными. Но, применяя аппроксимацию Больцмана (1), можно получить аналитическую характеристику элементов чувствительных, что повысит точность определения давления.

$$y = A_2 + \frac{A_1 + A_2}{\left(1 + e^{\frac{x - x_0}{\Delta x}}\right)}, \qquad (1)$$

где A_1, A_2 – коэффициенты, рассчитываются для каждого элемента чувствительного;

x, x_0 – значение полученных точек с блока электронного;

y – искомое значение параметра давления, выдаваемое пользователю.

На рис. 3 представлены градуировочные характеристики термопарного элемента.

При необходимости расширения измерительных диапазонов элементов чувствительных в составе ППК можно использовать различные подходы для улучшения метрологических характеристик. В работе инверсно-магнетронного элемента чувствительного предполагается использовать импульсный режим работы [3]. Для расширения рабочего диапазона термопарного элемента чувствительного предполагается использовать его как тепловой интегратор в разряженной газовой среде [4]. Применение данных подходов необходимо для формирования еще большего перекрывания диапазонов измерения элементов чувствительных.

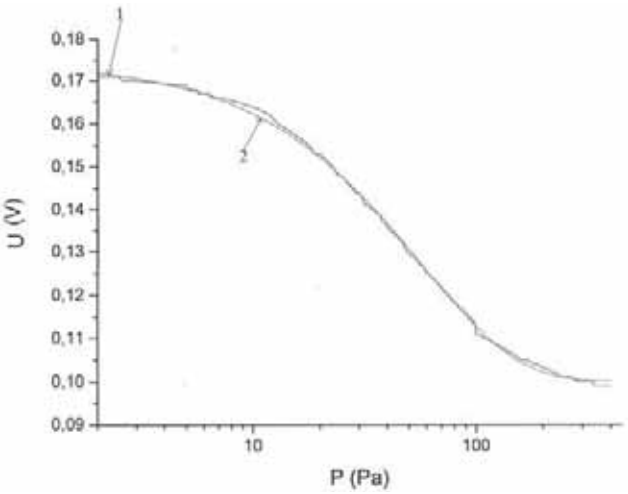


Рис. 3. Градуировочные характеристики термопарного элемента чувствительного: 1 – градуировочная характеристика выходного сигнала; 2 – аналитическая характеристика, построенная с помощью аппроксимации Больцмана

На рис. 4 и 5 представлены зависимости выходных параметров элементов чувствительных от давления. На рис. 4 представлены градуировочные характеристики инверсно-магнетронного и термопарного элементов чувствительных. На рис. 5 представлены градуировочные характеристики элемента термопарного и тензорезистивного. Из графиков видно перекрытие градуировочных характеристик.

Двигаясь в направлении изготовления вакуумметра для промышленности, реализация блока электронного и блока вторичной обработки будет осуществлена с помощью микропроцессорной техники, что позволит конкурировать с

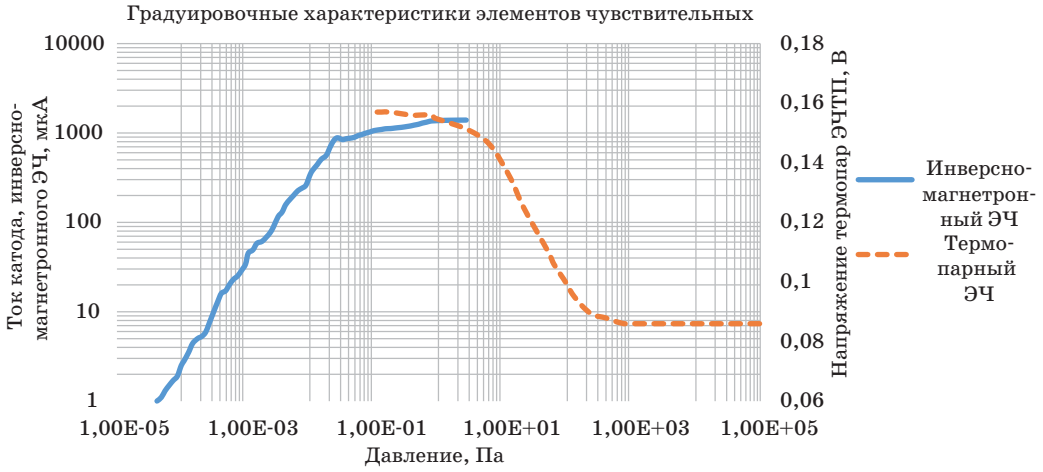


Рис. 4. Градуировочные характеристики термопарного элемента чувствительного и инверсно-магнетронного

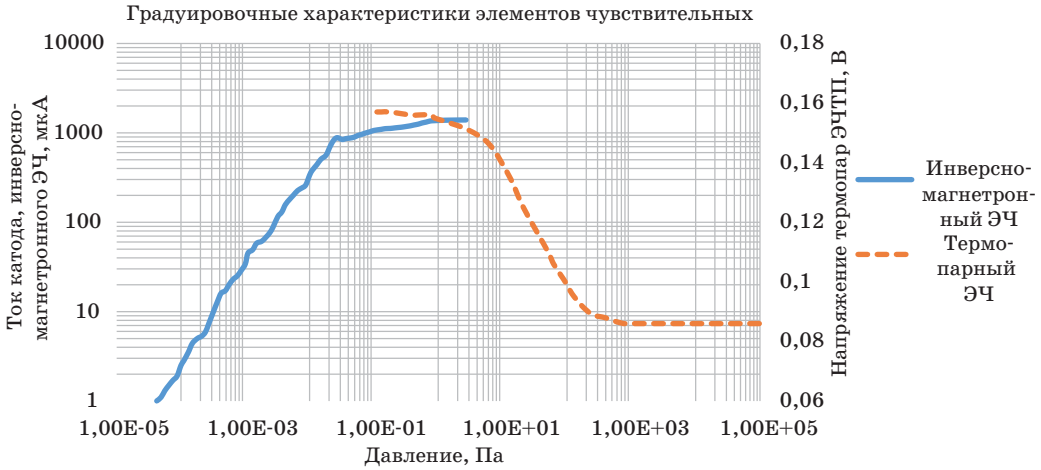


Рис. 5. Градуировочные характеристики термопарного элемента чувствительного и тензорезистивного

СС-10 по массогабаритным параметрам, а также применять новые способы управления и работы с элементами чувствительными.

Заключение

Изготовление блока электронного и блока вторичной обработки сигналов с применением отечественных комплектующих позволит применять данный вакуумметр в космической и ядерной промышленности.

Разработка нового широкодиапазонного комбинированного отечественного вакуумметра с возможностью интегрирования в современные измерительные стенды предоставит возможность отказаться от импортных вакуумметров.

Библиографический список

1. Опыт разработки и эксплуатации систем контроля давления и герметизации для обитаемых космических аппаратов / Т. П. Андронова, Б. А. Ксенофонтов, Л. В. Малейко, Е. И. Юревич. СПб.: НТВ СПбГТУ, 2000. № 4. С. 25–28.

2. Матер. междун. науч.-техн. конф. «Вакуумная техника и технология». Мониторинг герметичности космического аппарата / В. А. Гапонов, Л. Н. Розанов, Д. В. Ратушный и др. НИИВТ им. С. А. Векшинского, 2016. С. 240–246.

3. Huiyong M. и Yi. W. Inverted-Magnetron Cold-Cathode Gauge in Hybrid-Discharge Mode // Journal of Vacuum Science and Technology *A*. 2007. Т. 25. № 281. P. 281–284.

4. Eric Gavignet, François Lanzetta. Dynamic Operation of a Micro-Thermocouple Sensor as a Vacuum Gauge. 2014. V. № 100. P. 18–21.

УДК 547.44:669.094.3:541.12.012

Т. Е. Крылова
старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Ю. Т. Вираненко
доктор химических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова

С. Б. Кочерегин
кандидат химических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова

ОКИСЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО РАЗВЕТВЛЕННОГО АЛЬДЕГИДА C_{10} В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ЖИДКОСТЬ – ЖИДКОСТЬ

Предложен способ получения 2-изопропил-5-метил-2-гексановой кислоты из 2-изопропил-5-метил-2-гексаналя с высокой селективностью. Выявлено влияние температуры, состава кислородсодержащего газа и концентрации исходного альдегида на выход целевого продукта и скорость реакции.

Ключевые слова: *окисление, двухфазная система, кислородсодержащий газ, предельный альдегид С10, предельная кислота C_{10}, предельная надкислота C_{10}.*

T. E. Krylova
Senior Lecturer
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Yu. T. Vigranenko
Dr. Sc., Chem., Professor
St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov

S. B. Kocheregin
PhD, Chem., Associate Professor
St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov

OXIDATION OF THE SATURATED BRANCH ALDEHYDE C_{10} IN A TWO-PHASE SYSTEM LIQUID-LIQUID

Provided highly selective method the preparation of 2-isopropyl-5-methyl-2-hexanoic acid from 2-isopropyl-5-methyl-2-hexanal. The influences of temperature, composition of oxygen-containing gas and concentrations of initial aldehyde on yield of final product and reaction rate were shown.

Keywords: *oxidation, two-phase system, the oxygen-containing gas, the limiting aldehyde C_{10}, limiting acid C_{10}, limit peracid C_{10}.*

Высшие разветвленные карбоновые кислоты находят практическое применение при получении водорастворимых красок, меламиноформальдегидных смол, автомобильных эмалей и, кроме того, используются в качестве экстрагентов для извлечения лантаноидов и актиноидов из водных растворов их солей [1]. Такие же области применения может найти и предельная разветвленная 2-изопропил-5-метил-2-гексановая кислота. В качестве метода ее синтеза нами была выбрана реакция (1) окисления 2-изопропил-5-метил-2-гексаналя, который, в свою очередь,

можно получить путем кротоновой конденсации 3-метилбутаналя и гидрирования С=С связи в 2-изопропил-5-метил-2-гексеналя.

$$C_9H_{19}CHO+0.5O_2 \xrightarrow{cat} C_9H_{19}CHOH \quad (1)$$

Это обусловлено тем, что сходный процесс производства 2-этилгексеновой кислоты из 2-этил-2-гексеналя реализован в промышленном масштабе в России на заводе бутиловых спиртов АО «Сибурхимпром» в г. Перми [2].

Реакция окисления насыщенных алифатических альдегидов описана в литературе. В качестве катализаторов используются соли меди, никеля, марганца, палладия, серебра, платины, кобальта [3, 4], однако выходы кислоты недостаточно высоки и не превышают 65%. Описано также использование для окисления альдегидов солей щелочных и щелочно-земельных металлов [5], а также водных растворов гидроксидов натрия [6], которые ускоряют реакцию окисления n-гексадекана.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование реакции окисления предельного разветвленного альдегида C_{10} проводили в реакторе, изготовленном из нержавеющей стали объемом 1 дм^3, снабженном мешалкой, электропечью, карманом для термопары, вентилем для подачи кислородсодержащего газа и отсекаемой емкостью объемом 10 см^3 для отбора проб жидкой фазы. Высокая скорость мешалки (≈2800 об/мин) обеспечивала протекание реакции окисления изодеканаля в кинетической области и интенсивное перемешивание водной и органической фаз. В реактор, продутый аргоном, заливали раствор исходного альдегида в гексане, включали нагрев и перемешивание.

При проведении реакции с добавками водных растворов гидроксида натрия последний заливали в реактор вместе с раствором альдегида C_{10}. Затем в реактор подавали кислородсодержащий газ. Момент его подачи считался началом реакции (1). В ходе опытов производили отбор проб жидкой фазы. При наличии в реакционной смеси водного раствора NaOH нижняя (водная) фаза отделялась в делительной воронке, а верхняя (органическая) фаза анализировалась методом газожидкостной хроматографии в следующих условиях. Длина колонки – 4 м, внутренний диаметр колонки – 3 мм, материал колонки – нержавеющая сталь. Неподвижная фаза – полиэтиленгликоль ПЭГ-40М, нанесенный на твердый носитель цветохром – 10% от массы носителя. Детектор – пламенно-ионизационный. Газохроматографический анализ проводился с программированием температуры. Начальная температура колонки 60 °С. Конечная температура колонки 220 °С. Скорость подъема температуры 3°/мин. Температура детектора 160 °С. Температура испарителя 200 °С, газ-носитель – аргон. Скорость подачи аргона $3{,}9\cdot10^{-4}$ дм^3/с, скорость подачи воздуха $6{,}5\cdot10^{-4}$ дм^3/с. Кислородсодержащий газ готовили смешением в стеклянной емкости кислорода и азота. Анализ кислородсодержащего газа осуществляли также методом газожидкостной хроматографии на колонке длиной 2 м и внутренним диаметром 4 мм, изготовленной из нержавеющей стали, которая была заполнена сложным эфиром триэтиленглиголя и н-масляной кислоты ТЭГН (неподвижная фаза), нанесенным на твердый носитель ИНЗ-600 – 8% от его массы. Детектор пламенно-ионизационный. Температура испарителя 30 °С, температура колонки 20 °С, температура детектора 60 °С. Скорости подачи аргона и воздуха – такие же, как и при анализе продуктов окисления альдегидов C_{10}.

В качестве катализаторов были использованы соли марганца, калия и водный раствор гидроксида натрия как наиболее доступные и важные для промышленного применения. В присутствии соединений Mn^{2+} и ацетата калия выход предельной кислоты C_{10} не превышал 60% из-за недостаточной активности этих катализаторов. Более высокие выходы целевого продукта были достигнуты при осуществлении реакции (1) в гетерофазной системе жидкость – жидкость, где в качестве катализатора используется 10%-й водный раствор NaOH. Поэтому все дальнейшие исследования выполнялись в его присутствии.

Было изучено влияние температуры, состава кислородсодержащего газа и концентрации исходного изодеканаля на скорость и селективность реакции его окисления. Температура (табл. 1) оказывала существенное влияние на протекание реакции (1). В интервале температур 20–40 °С, хотя окисление альдегида C_{10} и протекало с высокой селективностью (94–97%), конверсия изодеканаля не превышала 50%. Из побочных продуктов его окисления были идентифицированы надкислота C_{10} и продукты конденсации, образующиеся согласно уравнений (2) и (3).

$$C_9H_{19}CHO+O_2 \longrightarrow C_9H_{19}CO_3H \quad (2)$$

$$2C_9H_{19}CHO+O_2 \longrightarrow C_{19}H_{37}CHO+H_2O \quad (3)$$

Более обнадеживающие показатели по конверсии (87%) и селективности (90%) наблюдались при 80 °С. Повышение концентрации кислорода в кислородсодержащем газе с 20,9% до 65,9% об. (табл. 2) приводило к ускорению окисления изодеканаля: его конверсия повысилась с 64% до 98%. Одновременно возрастают и скорости побочных реакций (2) и (3), что приводит к снижению селективности по целевому продукту с 96% до 84%. Изменение концентрации исходного альдегида C_{10} в загрузке с 29,1% до 75,9% мас. (табл. 3) практически не изменяли показатели реакции (1) по скорости и селективности, что свидетельствует о ее первом порядке по изодеканалю [8].

ВЫВОДЫ

1. Реакция окисления насыщенного альдегида в присутствии водного раствора NaOH имеет первый порядок по изодеканалю в интервале его концентраций 99,1–75,7% мас. и положительный порядок по кислороду.

2. Найдены приемлемые условия синтеза предельной разветвленной кислоты C_{10}, обеспечивающие выход целевого продукта более 80%.

Библиографический список

1. Краткий справочник нефтехимика / Под ред. В. А. Рыбакова. СПб: Химия, 1993. 464 с.

2. *Ганкин В. Ю., Гуревич Г. С.* Технология оксосинтеза. Л.: Химия, 1981. 272 с.

3. Заявка 1201637 ЕПВ МПК 7 co7 c51/27. Заявл. 24.80.2001. опубл. 2.05.2002.

4. *Debashic C., Ravikumar G., Payal M.* Tetrahedroun Lett, 2009. V. 50. Nr. 47. P. 6553–6556.

5. Заявка 802004055252 Германия МПК 7 co7 c51235, B 01 J.31/04. Заявл. 16.11.2004. опубл. 24.05.2006.

6. *Проскуряков В. А., Потехин В. М.* // Журнал прикладной химии. Т. 39. № 80. С. 2389–2393 (1996).

7. *Ганкин В. Ю., Рудковский В. М., Рыбаков В. А.* // Журнал прикладной химии. 1971. Т. 6. С. 1347–1351.

8. *Денисов Е. Т.* Химическая кинетика. М.: Наука, 2000. 565 с.

Приложение

Влияние температуры на скорость и селективность реакции окисления изодеканаля кислородсодержащим газом в присутствии 10%-го водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фаз 1:1. Загрузка: 140 мл гексана, 140 мл предельного альдегида C_{10}. Время реакции – 90 мин, скорость подачи (органическая фаза) кислородсодержащего газа 8 дм^3/ч [O_2] в кислородсодержащем газе = 20,9% об.

Таблица 1

Температура	Состав органической фазы, % мас.					Конверсия альдегида C_{10}, %	Селективность по кислоте C_{10}, %
	Гексан	Предельный альдегид C_{10}	Надкислота C_{10}	Предельная кислота C_{10}	ВКП		
20	40,6	36,6	0,7	22,0	0,1	36	97
40	40,4	30,2	1,4	27,7	0,3	47	94
60	39,9	17,4	2,1	39,2	2,4	69	92
80	39,5	7,2	1,6	47,9	3,8	87	90

Влияние состава кислородсодержащего газа на скорость и селективность реакции окисления изодеканаля в присутствии 10%-го водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фазы 1:1. Температура 60 °С. Время реакции 90 мин. Загрузка: 140 мл гексана, 140 мл предельного альдегида (органическая фаза). Скорость подачи кислородсодержащего газа 8 дм^3/ч.

Таблица 2

[O_2] в кислородсодержащем газе, % об.	Состав органической фазы, % мас.					Конверсия альдегида C_{10}, %	Селективность по кислоте C_{10}, %
	Гексан	Предельный альдегид C_{10}	Надкислота C_{10}	Предельная кислота C_{10}	ВКП		
20,9	40,0	20,3	0,7	38,0	1,0	64	96
49,3	39,6	8,3	1,5	48,0	2,6	85	92
65,9	39,3	1,1	0,8	50,1	8,7	98	84

Влияние температуры на скорость и селективность реакции окисления изодеканаля кислородсодержащим газом в присутствии 10%-го водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фаз 1:1. Объем загрузки жидкой фазы (органический слой) 280 мл. Время реакции – 90 мин, скорость подачи (органическая фаза) кислородсодержащего газа 8 дм^3/ч [O_2] в кислородсодержащем газе = 20,9% об.

Таблица 3

[альдегид C_{10}], % мас. в загрузке	Состав органической фазы, % мас.					Конверсия альдегида C_{10}, %	Селективность по кислоте C_{10}, %
	Гексан	Предельный альдегид C_{10}	Надкислота C_{10}	Предельная кислота C_{10}	ВКП		
29,1	69,5	8,6	1,3	20,2	0,4	70	90
57,4	41,0	17,1	2,7	38,6	0,6	69	92
75,7	23,0	20,0	3,8	51,7	1,5	72	91

Примечание

В табл. 1–3 ВКП – высококипящие побочные продукты.

УДК 681.5

А. Л. Ляшенко
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ АТОМНОГО РЕАКТОРА

В статье представлено описание системы контроля технологических параметров в активной зоне реактора АЭС РБМК-1000. Описана схема конструкции графитовой кладки активной зоны реактора. Рассмотрена методика моделирования объектов с распределенными параметрами. Разработана методика математического моделирования распространения тепла в ячейке технологического канала. Разработанная методика позволит проводить диагностирование физического состояния энергоблока.

Ключевые слова: *реактор, графитовая кладка, объекты с распределенными параметрами, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, диагностирование, программно-техническое обеспечение, средства контроля, автоматизация приборов контроля.*

A. L. Liashenko
PhD, Tech, Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF THERMAL PHYSICAL PARAMETERS OF THE HEATER IN THE TECHNOLOGICAL CHANNELS OF THE ATOMIC REACTOR

The article describes the control system of technological parameters in the reactor core of the RBMK-1000 NPP. A scheme for the design of the graphite core of the reactor core is described. The technique of modeling objects with distributed parameters is considered. A technique for mathematical modeling of heat propagation in a cell of a technological channel is developed. The developed technique will allow to diagnose the physical condition of the power unit.

Keywords: *reactor, graphite masonry, objects with distributed parameters, differential equation, modeling, control, diagnostics, software and hardware, control tools, automation of control devices.*

Введение

Современная АЭС представляет собой совокупность различных элементов оборудования, представляющих цепь сложных технологических связей, где происходят непрерывные взаимосвязанные процессы преобразования, перераспределения и передачи различных видов энергии. Любое изменение технологического параметра либо характеристики элемента оборудования в определенной степени влияет на параметры, характеристики и показатели работы всей системы. В процессе работы расходные и термодинамические параметры системы могут изменяться в пределах физически возможных и технически осуществимых изменений энергоносителей и конструкций и находятся в пределах технически допустимых эксплуатационных состояний материалов оборудования. Это вызывает необходимость учитывать множество технических ограничений, проявляющихся в виде равенств и неравенств, являющихся необходимыми условиями нормальной эксплуатации системы. Современные атомные станции имеют высокий уровень надежности, что доказано наукой и временем. В то же время приоритетом ядерной промышленности является обеспечение безопасности, и уделяется самое пристальное внимание ее совершенствованию. Огромная ответственность персонала атомных станций при работе с высокими технологиями требует постоянно учитывать даже маловероятные риски возникновения аварии. Этому способствует непрерывный мониторинг состояния реакторной установки.

Рассмотрим мониторинг параметров реакторной установки на примере реактора РБМК-1000, установленного на множестве атомных станций, в том числе и на Ленинградской АЭС.

Описание реактора

Станция включает в себя несколько реакторов и представляет собой спецкомплекс зданий, где размещается необходимое технологическое оборудование [1]. В главном корпусе находится реакторный зал. Тепло в активной зоне реактора отводится теплоносителем и используется для получения водяного пара, который вращает турбину электрогенератора.

Рассматриваемый реактор является гетерогенным канальным реактором с графитовым замедлителем и водяным кипящим теплоносителем. В качестве топлива используются уран-эрбиевые таблетки (диоксид урана UO2 с добавкой оксида эрбия Er2O3). Реактор состоит из графитовой кладки замедлителя цилиндрической формы, которая размещается в бетонной шахте, через нее проходят специальные каналы системы управления и защиты, а также технологические каналы с ядерным топливом, охлаждаемые водой.

Реактор РБМК-1000 имеет две петли контура многократной принудительной циркуляции

Рис. 1. Конструкция канального энергетического реактора РБМК-1000

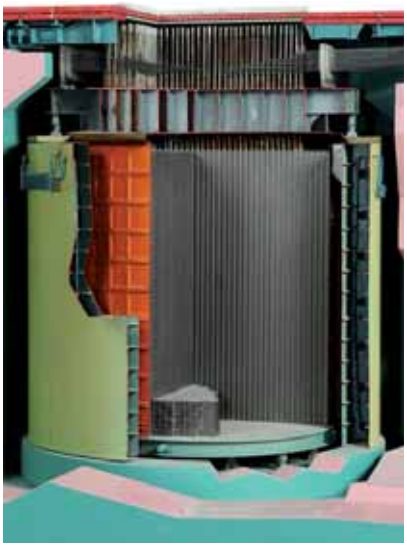


Рис. 2. Активная зона реактора

(КМПЦ), расположенные симметрично относительно осевой плоскости реактора. Каждая петля включает два барабана-сепаратора и четыре циркуляционных насоса, прокачивающих воду через технологические каналы [1]. Проходя через активную зону, вода нагревается до температуры кипения. Основным элементом реактора является активная зона – это графитовая конструкция, где протекает управляемая ядерная реакция и куда загружается ядерное топливо.

Главная задача безопасности реактора РБМК – постоянное поддержание необходимого охлаждения активной зоны. Подача теплоносителя в топливные каналы реактора в целях отвода тепла от тепловыделяющих сборок и от графитовой кладки осуществляется при помощи КМПЦ. В канальных реакторах существует возможность контроля и регулирования расхода теплоносителя по каждому технологическому каналу. Это позволяет иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор и получать на выходе всех каналов примерно одинаковые теплотехнические параметры. Для каждого канала необходимый расход определяется его мощностью, которая зависит от выгорания топлива и от места нахождения канала в реакторе. Во время эксплуатации мощность и требуемый расход теплоносителя изменяются постепенно, а при перегрузке топлива – скачкообразно (рис. 2). Теплоноситель подается в активную зону снизу по нижним водяным коммуникациям.

Регулирование расхода теплоносителя происходит при помощи запорно-регулирующего клапана (ЗРК). Регулирование расхода в технологическом канале (ТК) выполняется вручную. Управление запорно-регулирующим клапаном – довольно сложная и очень ответственная операция.

Операцию регулировки расхода воды в ТК производит оператор реакторного отделения.

Системам теплотехнического контроля реактора

Особенности теплотехнического контроля реакторов РБМК обусловлены доступностью для контроля любого из элементов реактора (включая элементы активной зоны), большим числом технологических каналов, каналов СУЗ, каналов охлаждения отражателя, разветвленностью циркуляционного контура и др.

К системам теплотехнического контроля относятся следующие системы контроля:

– температуры графитовой кладки;

– температуры тепловыделяющих элементов;

– температуры биологической защиты, металлоконструкций, бетона;

– поканального расхода теплоносителя и др.

Из общего числа точек (около семи тысяч) технологического контроля пять тысяч относятся к теплотехническому контролю, в который входят около трех тысяч точек контроля температуры и около двух тысяч точек контроля расхода теплоносителя и других теплотехнических параметров (давление, перепад давления, паросодержание и др.).

Из трех тысяч точек контроля температуры к штатным внутризонным температурным измерениям относятся 149 (85 – графитовая кладка, 64 – твэлы). Остальные измерения температуры касаются металлоконструкций, биологической защиты, контроля целостности ТК, сервоприводов СУЗ и др.

Почти все измерения проводятся с помощью кабельных термоэлектрических преобразователей (ТЭП) градуировки ХА и ХК, выпускаемых по разработанному ГОСТ 23847-79.

Система контроля температуры графитовой кладки. Система контроля температуры графитовой кладки базируется на данных, получаемых от 17 термометрических многозонных сборок. Сборки устанавливаются в «угловых» температурных ячейках на стыке 4 графитовых колонн. Ячейки расположены крестом по двум осевым диаметрам. На центральной оси 15 сборок (две из них в отражателе) и две ячейки на перпендикулярной оси в области плато реактора симметрично относительно центра кладки (рис. 3).

Термометрические сборки весьма специфичны, что связано с большими размерами (высотой и диаметром) графитовых реакторов, с необходимостью обеспечения защиты персонала от облучения и условиями работы ТЭП в активной зоне.

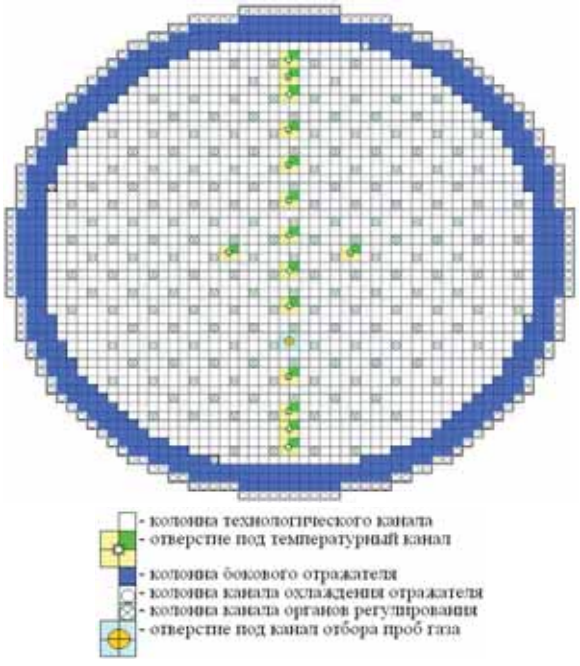


Рис. 3. Типовая схема расположения каналов в реакторе

Сами чувствительные элементы (ТЭП) составляют лишь малую долю объема устройства.

Реакторы РБМК-1000 оснащаются блоками БТ-0170 с тремя кабельными ТЭП диаметром 5 мм, размещенными в отверстиях графитовых втулок. Втулки собраны на центральной несущей трубе. Труба, как и оболочки ТЭП, изготовлена из высоконикелевого сплава ХН78Т, стойкого к науглероживанию.

Измерительные спаи ТЭП блока размещаются на границах «горячих поясов» верхнего и нижнего, а также в средней части активной зоны, т. е. в местах возможного нахождения максимальной температуры кладки. Гарантированный ресурс таких сборок составлял 3 года, хотя экспериментальные сборки работали на некоторых реакторах и дольше. Вся термометрическая сборка с защитной пробкой, графитовыми втулками и тремя ТЭП представляет единый неразборный блок, который погружается в «угловые» ячейки.

Измерение температуры ТВЭЛов. Термометрические ТВЭЛы, входившие в состав ТВС, разрабатывались и изготавливались в процессе создания и совершенствования конструкций ТВЭЛов и ТВС и испытывались на промышленных реакторах и на РБМК. Термометрический ТВЭЛ имеет двойную циркониевую оболочку – внутри штатной оболочки ТВЭЛа РБМК (диаметром 13,6х0,65) помещается оболочка ТВЭЛа ВВЭР (диаметром 9,1х0,35) с топливными таблетками повышенного обогащения. В зазор между оболочками устанавливаются на определенной отметке чувствительные элементы кабельных ТЭП, после чего зазор вакуумируется и заполняется расплавленным силумином. Вывод кабельных трасс осуществляется через переходник «сталь – цирконий». Такие термометрические ТВЭЛы используются для измерения температуры оболочек в термометрических кассетах (ТМК) в штатной системе теплотехнического контроля реакторов РБМК с 1986 г. Кроме того, с целью получения подробной информации о состоянии ТВЭЛов РБМК-1500 были созданы измерительно-диагностические ТВС (ИДТВС). В состав ИДТВС входят ТВЭЛы, в которых измеряются следующие параметры:

– температура оболочки ТВЭЛа;
– температура в центре топливных таблеток;
– внутритвэльное давление;
– удлинение топливного столба;
– температура оболочки и локальные значения теплового потока (термотеплометрический ТВЭЛ).

Измерение температуры парогазовой смеси. В реакторах РБМК система аварийной защиты по разрыву технологического канала (ТК) в реакторном пространстве действует по повышению давления в реакторном пространстве и на выходе парогазовой смеси из него. Для дублирования этого сигнала сигналом датчика, основанного на ином принципе действия, применительно к системе па-

рогазовых сбросов (ПГС) реакторов РБМК был разработан блок термоэлектрических преобразователей (БТ), содержащий четыре независимых ТЭП кабельного типа переменного диаметра.

Быстродействие БТ практически не отличается от быстродействия датчиков давления. Динамическая прочность блока термоэлектрических преобразователей при скоростях потока до 300 м/с и температуре 400 °С обеспечивается [4].

Анализ объекта и синтез системы управления. Мониторинг параметров реакторной установки связан с необходимостью анализа непрерывных физических процессов, протекающих в активной зоне. При анализе ядерных установок важная роль принадлежит расчету тепловыделяющей системы. Рассмотрим реактор атомной электростанции как систему с распределенными параметрами. Применим методы теории СРП для анализа процессов в активной зоне и синтеза систем управления этими процессами. Это позволит применить для управления процессами распределенный регулятор. Передаточная функция распределенного высокоточного регулятора имеет вид [3]:

$$W(x,y,p)=E_1\cdot\left[\frac{n_1-1}{n_1}-\frac{1}{n_1}\nabla^2\right]+E_4\times$$
$$\times\left[\frac{n_4-1}{n_4}-\frac{1}{n_4}\nabla^2\right]\cdot\frac{1}{p}+E_2\cdot\left[\frac{n_2-1}{n_2}-\frac{1}{n_2}\nabla^2\right]\cdot p,$$

где E_1, E_2, E_3 – коэффициенты усиления;

$\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – лапласиан;

n_1, n_2, n_3 – весовые коэффициенты.

Для разработки математической модели применим выведенное на основе первого закона термодинамики уравнение теплопроводности.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к графитовой кладке:

$$\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial t}=a_\Gamma\left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial x^2}+\right.$$
$$\left.+\frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial y}+\frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial z}\right]+\frac{a_\Gamma W_\Gamma}{\lambda_\Gamma V_\Gamma},$$

где a_Γ – коэффициент температуропроводности графита;

x, y, z – пространственные координаты;

W_Γ – мощность, выделяемая при торможении нейтронов;

λ_Γ – коэффициент теплопроводности графита;

V_Γ – объем графитовой кладки.

Уравнение теплопроводности при анализе тепловых процессов в технологических каналах удобнее записывать в цилиндрических координатах.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к циркониевой трубе.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial t}=a_\text{Ц}\left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2}+\right.$$
$$+\frac{1}{R}\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R}+\frac{1}{R^2}\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial\varphi^2}+$$
$$\left.+\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2}\right],$$

где $a_\text{Ц}$ – коэффициент температуропроводности циркония.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к теплоносителю в канале:

$$\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial t}=a_\Gamma\left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2}+\right.$$
$$+\frac{1}{R}\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R}+\frac{1}{R^2}\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial\varphi^2}+$$
$$\left.+\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2}\right]-\vartheta(R,t)\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y},$$

где ϑ – скорость движения теплоносителя в канале;

$a_\text{Т}$ – коэффициент температуропроводности теплоносителя.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к выбранной ячейке графитовой кладки в цилиндрических координатах.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial t}=a_\Gamma\left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2}+\right.$$
$$+\frac{1}{R}\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R}+\frac{1}{R^2}\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial\varphi^2}+$$
$$\left.+\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2}\right]+\frac{a_\Gamma W_\Gamma}{\lambda_\Gamma V_\Gamma}.$$

В разработанной математической модели присутствуют уравнения, записанные в прямоугольной и цилиндрической системе координат. Для их стыковки были выделены зоны цилиндрической формы в графитовых блоках, они совпадают с границами сквозных отверстий в графитовых блоках. Для этих зон были составлены дополнительно дифференциальные уравнения теплопроводности.

При моделировании рассматривались тепловые процессы, протекающие в графитовой кладке, состоящей из графитовых блоков. В технологическом канале располагается тепловыделяющая сборка, которая омывается теплоносителем. Положения ЗРК будем рассматривать как функ-

ции входа, а контрольные точки во внутренних зонах технологических каналов как функции выхода. Для мониторинга температуры в контрольных точках установим датчики температуры в каждом технологическом канале. Это позволит автоматизировать процесс регулирования расхода теплоносителя.

Для регулирования расхода теплоносителя и управления температурным полем активной зоны канального реактора предлагается использовать распределенный высокоточный регулятор (РВР). Проектирование распределенной системы управления позволит значительно повысить скорость реакции при возможных отклонениях параметров активной зоны реактора [4]. Структурная схема системы управления ЗРК с применением РВР представлена на рис. 4.

Математическая модель объекта управления описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, не имеющих аналитического решения, но, используя дискретную модель объекта управления, определим реакцию объекта на выбранные пространственные моды входного воздействия.

Для проведения частотного анализа разложим входное воздействие $U(x, z, t)$ в ряд Фурье. Входное воздействие, учитывая граничные условия, может быть представлено в виде

$$U(x,z,t) = L_3 + 0.1 \cdot L_S \cdot \sin\left(\Psi_\eta \cdot x_i\right) \cdot \sin\left(\overline{\Psi}_\gamma \cdot z_j\right),$$

где L_S – размер внутреннего диаметра трубы;

L_3 – текущее положение заслонки.

Найдем реакцию объекта на каждую составляющую ряда. Эту реакцию будем искать в виде

$$T_{\eta,\gamma}(x,y,z,t) = H_{\eta,\gamma}(y,t) \cdot \sin\left(\Psi_\eta \cdot x\right) \cdot \sin\left(\overline{\Psi}_\gamma \cdot z\right).$$

Для анализа объекта управления и расчета настроек регулятора будем использовать специаль-

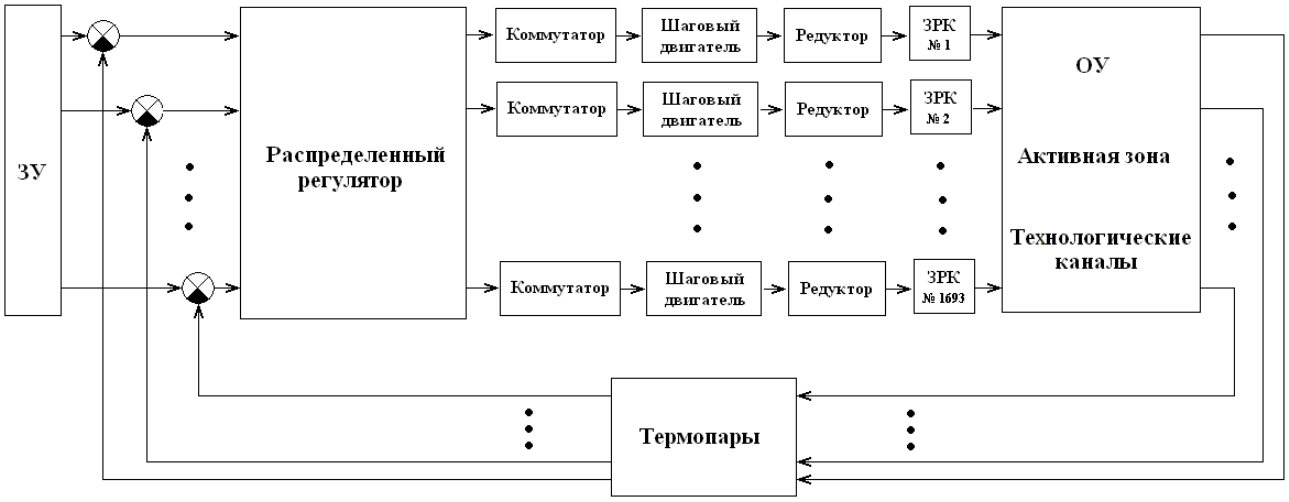


Рис. 4. Структурная схема

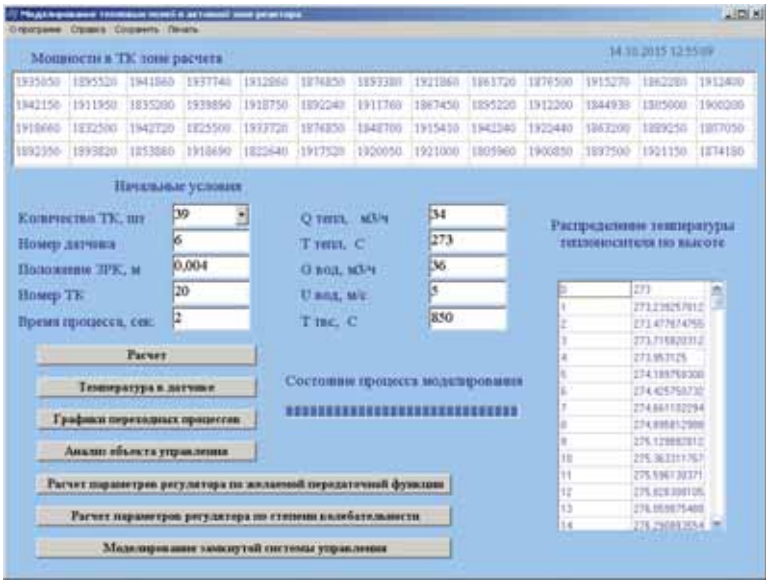


Рис. 5. Стартовое окно программы

но разработанное программное обеспечение. На рис. 5. представлено стартовое окно программы.

Результаты моделирования показали, что управление в замкнутой системе реализуется в соответствии с заданными требованиями.

Заключение

При таком принципе контроля и управления расходом теплоносителя автоматизируется регулировка ЗРК, оперативный персонал осуществляет только контроль технологических параметров активной зоны. Регулирование расхода теплоносителя по каждому каналу позволит на выходе всех каналов получать одинаковые теплотехнические параметры и, соответственно, иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор.

По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что система осуществляет регулирование температурного поля с высокой точностью и в полном соответствии с поставленными требованиями. Применение РВР для управления параметрами рассматриваемого объекта позволяет проектировать системы управления сложными тепловыми процессами активной зоны реактора канального типа, обеспечивая при этом безопасность эксплуатации АЭС.

Библиографический список

4. *Абрамов М. А.*, *Авдеев В. И.*, *Адамов Е. О.* / Под общей ред. Ю. М. Черкашова. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. 632 с.

5. *Морева С. Л.*, *Ляшенко А. Л.* Математическое моделирование тепловых процессов в активной зоне реактора // Научное обозрение. М.: АПЕКС-94. 2012. № 2. С. 182–188.

6. *Першин И. М.* Синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск, 2002. 212 с.

7. *Лысиков Б. В.*, *Прозоров В. К.* Термометрия и расходометрия ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 120 с.

УДК 537.528

Е. А. Малофеев
инженер
ООО «Новая Энергия»

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ВИХРЕВОГО ПРОТИВОТОЧНОГО ТИПА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

В статье предлагается использование камеры сгорания вихревого противоточного типа с целью повышения эффективности работы котельных установок.

Ключевые слова: *камеры сгорания вихревого противоточного типа, котельные установки, модернизация.*

E. A. Malofeev
Engineer
"New Energy" ltd

POSSIBILITY OF USING THE VORTEX FILM TYPE COMBUSTION CHAMBER IN BOILER INSTALLATIONS

The article proposes the use of a vortex counterflow type combustion chamber, in order to increase the efficiency of boiler plants.

Keywords: *combustion chamber vortex countercurrent type, boiler plants, modernization.*

Одними из основных узлов в котельных установках являются различные применяемые горелочные устройства. Широкое применение получили наддувные, или, как их еще называют, дутьевые горелочные устройства (комбинированного типа). В процессе эксплуатации горелочных устройств выявлен ряд недостатков, снижающих эффективность котельной установки. Можно предположить, что используемые горелки в котельных установках отжили свой век. На смену им можно рекомендовать использование камер сгорания вихревого противоточного типа (КСВП) вместо горелочных устройств.

Камерой сгорания называют устройство для наивыгоднейшего преобразования химической энергии топлива в тепловую энергию. Высокая теплонапряженность и минимальные тепловые потери – характерное отличие камер сгорания от традиционных горелок, применяемых в котельном агрегате.

КСВП зарекомендовали себя надежной работой в течение установленного ресурса. На сегодняшний момент идет борьба за экологичность, экономичность и надежность. КСВП по многим показателям превосходит горелку комбинированного типа. И, возможно, в скором будущем камеры сгорания заменят традиционную горелку как при использовании в котельных агрегатах, так и в других сферах применения горелочных устройств [1].

Работа КСВП осуществляется следующим образом: воздух из диффузора входит в сопловой тангенциальный закручивающий аппарат (см. *3* и *4* на рис. 1), ускоряется и выходит в вихревую камеру в виде сильно закрученного потока. В камере формируются 2 закрученных потока: периферийный (свободный) и приосевой (вынужденный). Периферийный поток движется в направлении топливной форсунки, а приосевой – в направлении выходного сопла *5*. Из форсунки впрыскивается топливо. Капли топлива отбрасываются в периферийный поток *6*, дробятся и испаряются, в результате чего в приосевом потоке *7* образует-

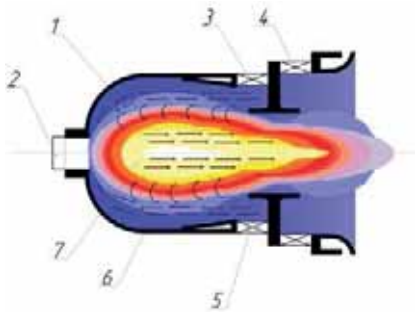


Рис. 1. Схема КСВП: 1 – корпус предкамеры; 2 – подвод топлива; 3 – первый тангенциальный завихритель; 4 – второй тангенциальный завихритель; 5 – сопло; 6 – холодный периферийный поток, 7 – горячий приосевой закрученный поток

ся топливовоздушная смесь, попадающая в жаровую трубу через выходное сопло *5*.

За счет сильно закрученных потоков, движущихся в разных направлениях, вращающихся в одном направлении, происходит максимально эффективное испарение топлива и перемешивание его с воздухом. Поэтому время пребывания топлива в камере сгорания уменьшается. Это позволяет сократить длину КС, а также способствует снижению выбросов NOx, поскольку сокращается время пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур. Кроме того, в горении участвует большее количество воздуха, поступающего в КСВП. Это приводит к уменьшению расхода охлаждающего воздуха на создание пристеночной завесы. Что, в свою очередь, способствует снижению выбросов оксидов углерода и несгоревших углеводородов. Происходит «замораживание» продуктов горения, вовлекаемых в слои воздуха, охлаждающие стенки жаровой трубы [2].

Рассматриваемая вихревая камера сгорания и ее модификации имеют перспективное значение для использования в устройствах по сжиганию топлива, котельных установках и различных областях применения. Указанная камера сгорания является надежной, технологичной, имеющей высокие технические, энергетические и экологические характеристики, а также способна работать на различных видах топлива.

Преимущества КСВП перед горелочными устройствами:

– невосприимчива к колебаниям климатических условий в широком диапазоне температуры, давления, влажности;

– максимально возможная полнота сгорания топлива;

– минимальные вредные выбросы;

– широкий диапазон устойчивой работы;

– способность работать на любом виде топлива (твердое, жидкое, газообразное);

– обладает эффективной тепловой изоляцией теплонапряженных элементов;

– способна работать при максимальной температуре продуктов сгорания данного вида топлива.

КСВП по своим параметрам и исполнению идеально подходит для использования ее в котельных установках вместо традиционных горелок. В перспективе установка КСВП в котельных установках позволит достичь более высокую производительность котла (КПД около 95%).

Библиографический список

1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 566 с.

2. *Новиков И. Н., Новиков Н. Н.* Поисковые исследования в области создания камер сгорания вихревого противоточного типа // Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей: тез. докл. V Всерос. науч. техн. конф. Самара: СГАУ, 2004. Вып. 5. С. 141–146.

УДК 544.72

Ю. С. Николаев
кандидат химических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ТЕРМОДИНАМИКА АДСОРБЦИИ ПАРОВ ВОДЫ НА ОКСИДЕ ОЛОВА (IV) И АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ

В статье рассмотрены вопросы термодинамики адсорбции паров воды на оксиде олова (IV) и предложено объяснение его антиобледенительных свойств.

Ключевые слова: *оксид олова (IV), вода, термодинамика, адсорбция, антиобледенительное покрытие.*

Yu. S. Nikolaev
PhD, Chem., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THERMODYNAMICS OF WATER ADSORPTION ON TIN (IV) OXIDE AND ANTI-ICING PROPERTIES OF COATINGS BASED ON IT

This article discusses the thermodynamics of adsorption of water vapor on tin (IV) oxide and suggests an explanation of its anti-icing properties.

Keywords: *tin (IV) oxide, water, thermodynamics, adsorption, ice-phobic coating.*

Термодинамика адсорбции паров воды на оксиде олова (IV) и антиобледенительные свойства покрытий на его основе

Поверхности пленки на основе SnO_2 используются в качестве антиобледенительных покрытий в самолетостроении и других транспортных средствах. Интерес к ним усилился после того, как в 2010 году автоконцерн Volkswagen объявил о начале производства нового типа покрытий автомобильных стекол, который был разработан специалистами The Fraunhofer Institute for Surface Technology [1]. В качестве такого покрытия был предложен индий-олово оксид (indium tin oxide, ITO), широко используемый в производстве жидкокристаллических сенсорных экранов, фотопреобразователей и в других областях. Разработанная технология позволила избавиться от традиционных недостатков классических покрытий из SnO_2 : малой механической прочности при изгибе, недостаточной оптической проницаемости и др. Пленка на основе ITO препятствует образованию наледи, налипанию снега и образованию инея при температурах до –20 °С, а при низких влажностях до –25 °С.

Такое действие объясняется снижением поверхностной энергии и теплоизоляционными свойствами ITO. В дальнейшем [2] оказалось, что эти пленки эффективно выполняют свою роль только в условиях невысокой влажности. При мокром снеге и тумане с последующим охлаждением слой наледи образуется все равно. Такие свойства не могут быть объяснены теми причинами, которые приводятся в [1]. Выяснение причин и условий антиобледенительного действия могут дать прямые термодинамические измерения в широком интервале температур. Эти исследования в условиях максимального приближения к реальным (низкие температуры и малые удельные поверхности образцов) представляются в настоящее время невозможными в силу недостаточной прецизионности современного лабораторного оборудования.

В этом плане интересно проанализировать некоторые особенности адсорбции паров воды на SnO_2, рассмотренные в [3]. Прямой перенос выводов в [3, 4] на «гидрофобные» свойства ITO невозможен, однако, как будет показано ниже, экспериментальные данные во многом объясняют некоторые особенности антиобледенительных свойств этих покрытий.

В [3] были измерены изотермы адсорбции (ИА) и теплоты адсорбции (ТА) на гидратированном диоксиде олова (ГДО) четырех образцов с удельной поверхностью (Sуд.) 225, 135, 124, 94 $м^2/г$ при температурах 288, 293, 298 К и ИА на непористом образце с $Sуд. = 7{,}7\ м^2/г$. Последний образец SnO_2 может рассматриваться

как максимально приближенный к реальным покрытиям на основе SnO_2.

Свойства поверхности ГДО подробно рассмотрены, например, в [4, 5]. При всех отличиях наиболее общими выводами являются следующие: поверхность SnO_2 обладает ярко выраженными амфотерными свойствами. Центрами адсорбции паров воды являются поверхностные гидроксильные группы, число которых может достигать 8–12 на 10 нм^2. ИК-спектральными исследованиями показано наличие как минимум трех типов гидроксильных групп. Даже при самых высоких температурах обработки на поверхности остаются адсорбционные центры группы $Sn-O-H$. Отмечается склонность поверхности к регидроксилированию при контакте с парами воды. Таким образом, поверхность SnO_2 не является в классическом понимании гидрофобной. Более того, большая концентрация гидрофильных центров и их кислотно-основной характер создают предпосылки для многовариантности взаимодействия молекул воды с поверхностью (увеличивается конфигурационная составляющая энтропии адсорбции).

Для ИА всех исследованных образцов (рис. 1, 2, 3) характерно наличие нескольких точек перегиба в различных областях заполнения. У высокодисперсных образцов (рис. 2, 3) присутствует петля гистерезиса. Для непористого образца (рис. 1) характерно наличие вогнутого участка начальной части ИА. Кривые ТА (рис. 4, 5) обнаруживают ряд участков с постоянным уровнем тепла (плато) и два хорошо воспроизводимых максимума (I и II), которым соответствуют точки перегиба на ИА. Характерно, что для всех исследованных образцов максимумы наблюдаются при заполнениях около 16 и 19. При увеличении температуры от 293 К до 298 К максимум I исчезает, но увеличиваются ТА при малых заполнениях.

Присутствие плато на кривых ТА свидетельствует о наличии на поверхности различных по силе центров адсорбции. В то же время, за исключением начальных участков, теплота адсорбции составляет порядка 50 кДж/моль, что лишь на 5 кДж/моль превышает теплоту конденсации паров воды.

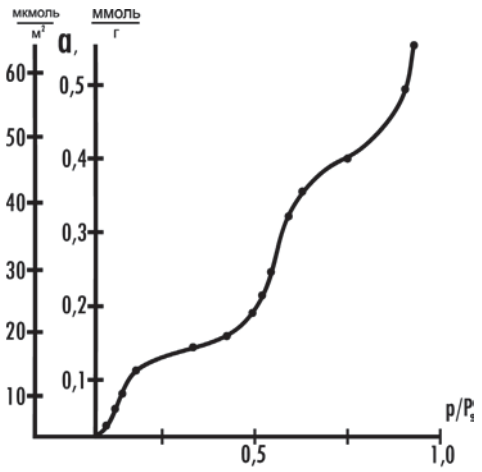


Рис. 1. Изотерма адсорбции паров воды при 293 К образца SnO_2, Sуд = 767 м^2/г

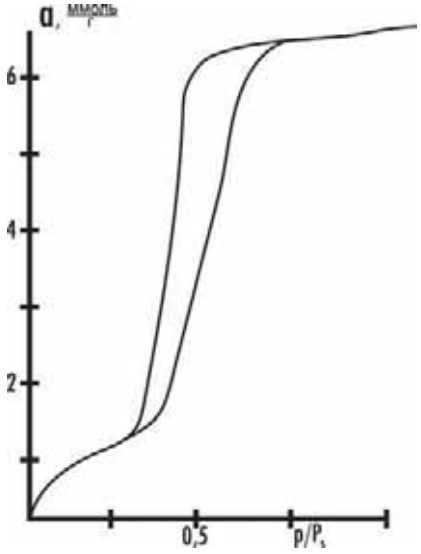


Рис. 2. Изотерма адсорбции паров воды при 293 К образца SnO_2, Sуд = 124 м^2/г

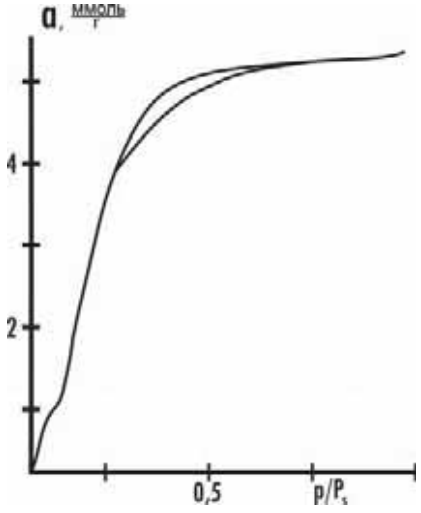


Рис. 3. Изотерма адсорбции паров воды при 293 К образца SnO_2, Sуд = 225 м^2/г

Появление максимумов на кривых ТА свидетельствует о формировании структурированной пленки воды на поверхности при заполнениях, достаточных для ее образования. Характерно, что ее формирование происходит вне зависимости от пористой структуры (от микропористых до непористых образцов) и от степени кристаллличности при относительных давлениях (P/Ps) порядка 0,45–0,5. Максимумы свидетельствуют о том, что при формировании монослоя структурированной воды общая энергия системы уменьшается за счет кооперативных (латеральных) взаимодействий адсорбированных молекул воды. Одна из возможных структур монослоя воды предложена [6]. В настоящее время не суще-

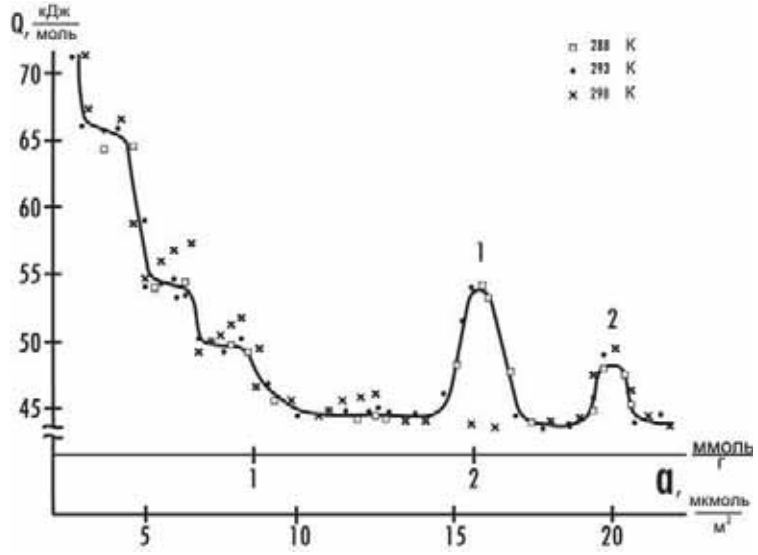


Рис. 4. Дифференциальные теплоты адсорбции паров воды для образца SnO_2, $S_{уд} = 124$ м^2/г

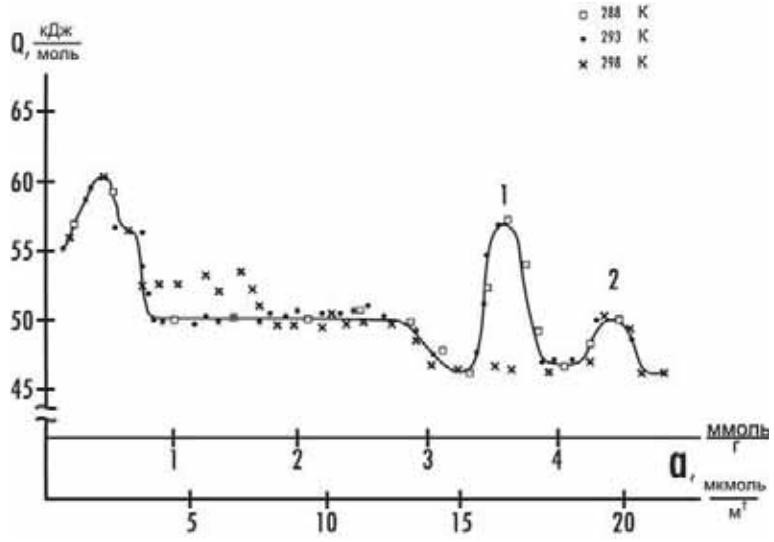


Рис. 5. Дифференциальные теплоты адсорбции паров воды для образца SnO_2, $S_{уд} = 225$ м^2/г

ствует единого мнения о состоянии как жидкой, так и структурированной поверхности воды. Этой проблеме посвящены сотни публикаций. Одни из наиболее подробных – [7, 8]. Поэтому представляется разумным обсуждать проблему структурированной воды в ее взаимодействии с парами с точки зрения наиболее общих термодинамических законов. Одним из таких законов является правило фаз Гиббса. В применении к гетерогенным однокомпонентным системам оно, как известно, может быть сформулировано следующим образом: две фазы (жидкость – пар, твердое – пар, твердое – жидкость) в однокомпонентной системе могут существовать в равновесии только при наличии устойчивой границы раздела между ними. И, что не менее важно, такое равновесие возможно лишь в относительно узких значениях интенсивных параметров системы (давление, температура и др.). Этот закон строго соблюдается и находит подтверждение в классических примерах невозможности сосуществования в одном «монокристалле» двух аллотропных модификаций, полиморфных форм, кристаллогидратов и т. д.

Структура адсорбированного монослоя на поверхности отличается от структуры соответствующих объемных жидких и твердых фаз хотя бы потому, что это монослой. Наиболее убедительно это показал Зисман [9]: смачивающая жидкость может адсорбироваться на поверхности, образуя ориентированный монослой, по которому она сама не может растекаться. Такие жидкости он назвал аутофобными.

При увеличении концентрации объемной фазы монослой может увеличиваться и переходить в полислой вплоть до определенных размеров.

Естественно, что при увеличении толщины хотя бы до трех монослоев адсорбированная пленка на поверхности имеет возможность приобретать структуру, отвечающую состоянию объемной фазы. По правилу фаз Гиббса в этом случае должно произойти разделение компонента на две фазы, связанные между собой уже не адсорбционными, а адгезионными силами.

Все вышеизложенное позволяет предположить, что покрытия на основе SnO_2 обладают рядом общих свойств при адсорбции воды. Поверхность SnO_2 не является гидрофобной. Адсорбция паров воды приводит к формированию монослойной (или близкой к ней) структуры на поверхности. Такая структура является аутофобной по отношению к парам воды. Поэтому в условиях равновесия на ней не образуются зародыши объемной фазы воды (наледь, иней и т. д.). Однако, как показывает рис. 1, при высоких влажностях (P/Ps > 0,7) на поверхности адсорбента формируется слой обычной водной фазы, то есть происходит фазовый переход (структурированная – «обычная» вода или «обычный» лед при низкой температуре). Чем более энергетически однородна поверхность, тем более резко он происходит. Все это хорошо согласуется с некоторыми уже отличенными недостатками покрытий на основе ITO: образованием слоя наледи при взаимодействии с туманом с последующим охлаждением, что и является обычным фазовым переходом согласно правилу фаз Гиббса.

Список литературы

1. *Czyszka B.* The Icefree Windshield. Fraundhofer Institut for Surface Engineering and Rhin Films Ist, Annual Report. Maul-Druck GmbH, Braunschweig. 2010. 57 p.

2. Anti-Icing Nanocoafigs / Nahotech Maguzin, 2014. 09. P. 40–41. [Электронный ресурс]. URL: www.nanotech.mag.com/wp-content/uplads /2014/09/NanoCoatings.

3. *Николаев Ю. С.* Влияние модифицирования катионами переходных металлов на адсорбцию паров воды силикагелем и гидратированным диоксидом олова: автор дис... канд. хим. наук: 02.00.04.1987 / Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1987. 19 с.

4. *Денисова Т. А.* Состояние воды в гидротированных диоксидах титана и олова: автореф. дис... канд. хим. наук: 02.00.01 / Академия наук СССР. Уральский научный центр. Институт химии. Свердловск, 1985. 23 с.

5. *Кострикин А. В.* Гидроксо- и гидроксооксосоединения элементов подгрупп германия и титана: синтез, строение и свойства: автор. дис... д-ра химич. наук: 02.00.01 / Российский ун-т дружбы народов. М., 2015. 47 с.

6. *Николаев Ю. С.* О величине посадочной площадки молекулы на углеродных сорбентах в модели монослойной адсорбции // Завалишинские чтения: сб. докл.; СПб.: ГУАП, 2016. С. 186–188.

7. *Маленков Г. Г.* Структура и динамика жидкой воды // Журнал структурной химии. 2007. Т. 47. Nr. Suppl. P. 5–35.

8. *Захаров С. Д., Мосячина И. В.* Кластерная структура воды (обзор) // Препринт / Учреждение Рос. акад. наук, Физ. ин-т. им. П. Н. Лебедева. ФИАН. № 11. 24 с.

9. *Hare E. F., Zisman W. A.* Autophobic Ziquids and the Properties of their Adsorbed Films / y& Phys Chem., 1955. V. 59. Nr. 4. P. 335–340.

УДК 681.786.3:519.653

М. А. Турубанов
старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УСРЕДНЯЮЩЕГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

В статье рассматривается новый подход к анализу качества изготовления фотошаблонов измерительных марок для оптических угломерных устройств.

Ключевые слова: *оптические измерительные системы, математические методы обработки информации.*

M. A. Turubanov
Senior Lecturer
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MEAN-VALUE DIFFERENTIATION METHOD FOR PHOTOMASK QUALITY EVALUATION

The article is devoted to the new approach of photomask quality evaluation for optical angle measurement devices.

Keywords: *optical measurement systems, mathematical methods of data processing.*

Оптические угломерные устройства, называемые автоколлиматорами, служат для измерения углов наклона одного объекта относительно другого, такие приборы можно встретить в различных технических системах: системы фокусировки, геодезические измерительные системы, системы прицеливания и стартовой автоматики ракет и т. д. Устройство электронного автоколлиматора продемонстрировано на рис. 1 [1, 2].

Автоколлиматор работает следующим образом: свет от источника проходит через линзу, тем самым формируется параллельный пучок излучения, который засвечивает фотошаблон. Фотошаблон представляет собой металлическую пластину с прорезью в виде щели, если автоколлиматор одноосевой, либо в виде круглого отверстия, если автоколлиматор двухосевой. Пройдя через фотошаблон, свет попадает в расщепитель, который выполнен в виде склейки двух призм, часть света из расщепителя сразу попадает на сенсор, на котором формируется изображение фотошаблона, называемое опорной маркой. Другая часть света из расщепителя попадает в объектив автоколлиматора, который формирует параллельный пучок света, который, в свою очередь, выходит из автоколлиматора. Выходной пучок отражается от измеряемого объекта под неким углом и возвращается в автоколлиматор, где, снова пройдя через объектив, изображение проецируется на сенсоре, создавая так называемую измерительную марку.

Система управления автоколлиматора обрабатывает изображение с сенсора, по определенному алгоритму находятся центры масс измерительной марки и опорной марки, и по разнице их координат можно определить угол наклона измеряемой поверхности относительно сенсора прибора. Несмотря на то что изображение марки дискретно, т. е. квантуется по пикселям сенсора, координаты марки определяются на субпиксельном уровне в зависимости от перераспределения света между соседними пикселями, таким образом можно достичь крайне высокой точности измерения угла, не ограниченной фактическими

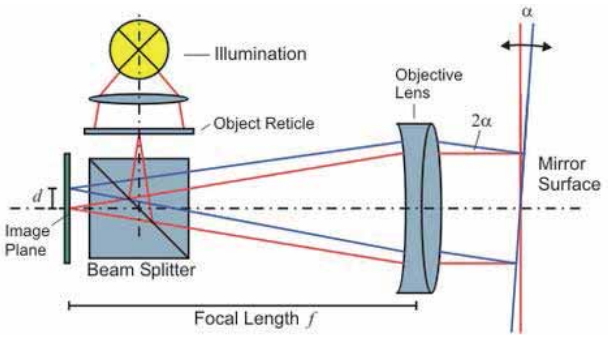


Рис. 1. Устройство автоколлиматора

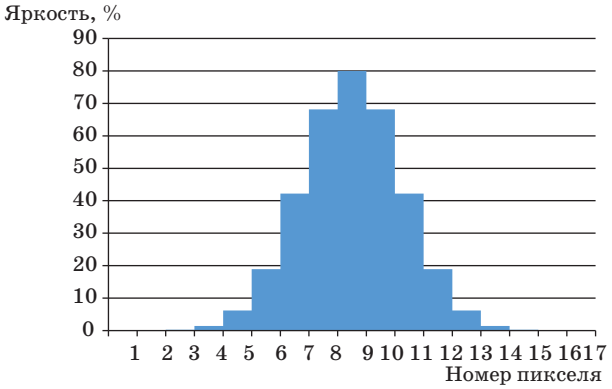


Рис. 2. Профиль измерительной марки

размерами единичного пикселя. На рис. 2 представлен пример профиля марки, получаемого с сенсора автоколлиматора.

После того как параллельный пучок покидает автоколлиматор и проходит через внешнюю среду, часть света рассеивается, поэтому снижается энергетика пучка, и таким образом яркость измерительной марки может оказаться низкой по сравнению с опорной маркой. Данная проблема не скажется на точности измерения только в том случае, если с изменением яркости марки ее координаты остаются неизменными. Такое возможно, если профиль изображения марки симметричен относительно своего центра, и, следовательно, можно сказать, что под качеством изготовления фотошаблона понимается то, насколько симметричен профиль создаваемой им марки.

Определить, насколько несимметричен профиль марки можно, например, с помощью численного дифференцирования данного профиля и сравнения по модулю минимального и максимального значения производной. В случае если профиль симметричен, значения должны быть равны, в противном случае разница значений показывает, насколько профиль несимметричен.

Численный метод расчета производной применяется во многих областях науки и техники: системы управления, измерительное оборудование, цифровая обработка сигнала, обработка результатов измерений и экспериментов и т. д. Вычисление производной изменяющегося по времени сигнала осуществляется следующим образом:

$$y'_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t},$$

где y'_i – значение производной функции в текущий момент времени; y_i – значение функции в текущий момент времени; y_{i-1} – значение функции в предыдущий момент времени; Δt – временной интервал между точками y_i и y_{i-1} (шаг дискретизации).

Описанный выше способ вычисления производной применяется повсеместно, но обладает одним существенным недостатком, как и сам по себе процесс дифференцирования: при обработке зашумленной функции происходит значительное усиление шума. Данная проблема проиллюстрирована на рис. 3, где в качестве исследуемой функции был взят синусоидальный сигнал частотой 50 Гц и наложенным поверх него белым шумом с частотой, равной частоте дискретизации (100 кГц) и максимальным размахом 0,5% от максимальной амплитуды сигнала.

Как видно из рис. 3, в результате дифференцирования произошло усиление шума, что привело к невозможности выявить фактическое значение производной исходного сигнала. Стоит отметить, что подобного рода шум в цифровой системе может быть вызван, например, работой аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а именно некачественным питанием по линии опорного напряжения.

Для выделения значения производной незашумленного сигнала могут применяться различные цифровые фильтры, такие как фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры) и фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры). Применение фильтров связано с определенными проблемами, основные из которых перечислены ниже.

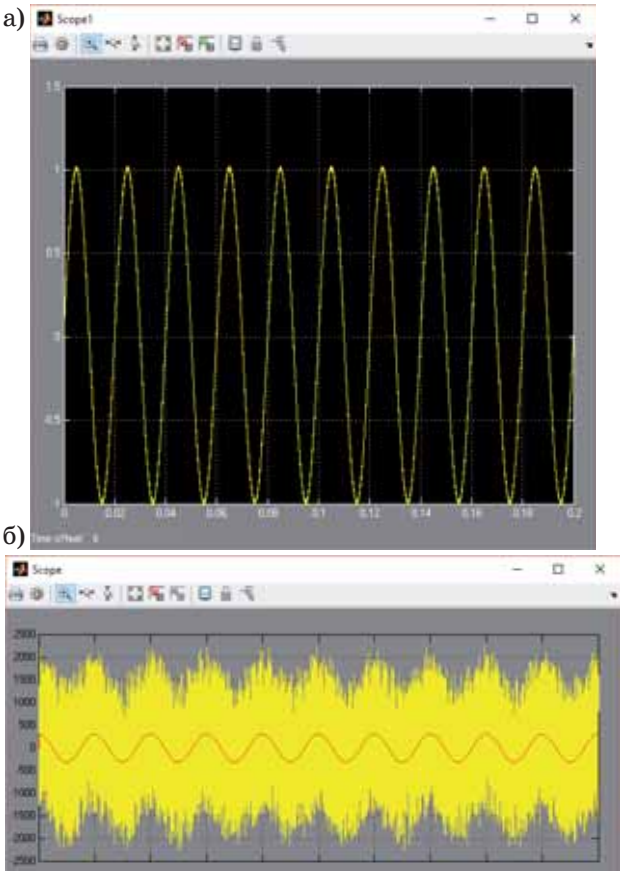


Рис. 3. Классический способ численного дифференцирования: а) исходный сигнал с добавлением шума; б) результат дифференцирования, красным обозначена производная незашумленного сигнала

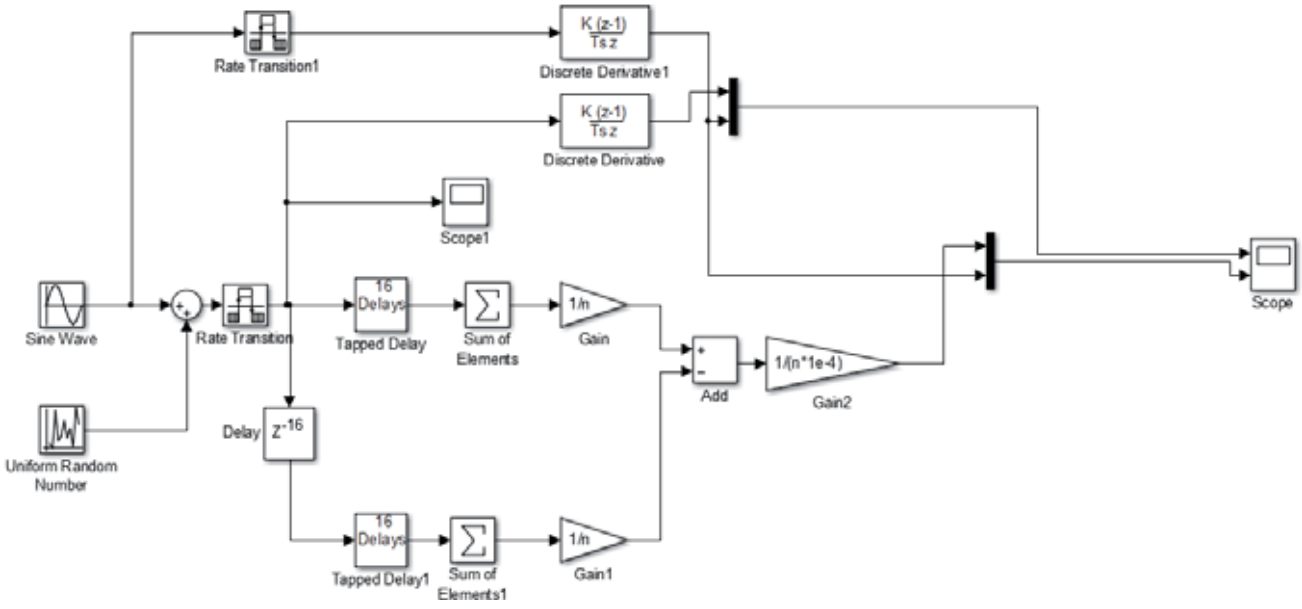


Рис. 4. Математическая модель метода усредненного вычисления производной

1. Цифровая фильтрация требует значительных вычислительных ресурсов, особенно если используются фильтры достаточно высоких порядков (>100).

2. Фильтр настраивается на конкретную полосу частот и при изменении параметров шума может перестать работать.

3. В выходном сигнале появляется нежелательный фазовый сдвиг, вызванный работой фильтра.

Альтернативой классическому методу может являться разработанный метод вычисления производной с усреднением точек. Суть метода заключается в следующем: производная вычисляется не по двум соседним значениям сигнала, а по средним значениям двух соседних окон выборки $N1$ и $N2$. В таком случае в математическом представлении производная будет определяться следующим образом:

$$y'_i = \frac{\overline{y}_{N2} - \overline{y}_{N1}}{\Delta t_в},$$

где y'_i – значение производной функции в текущий момент времени; y_{N1} – среднее значение функции в выборке $N1$; y_{N2} – среднее значение функции в выборке $N2$; $\Delta t_в$ – время формирования выборок $N1$, $N2$.

Среднее значение функции в окнах выборок определяется как

$$\overline{y}_{N1} = \frac{1}{n_1}\sum_{i=1}^{n_1} y_i \text{ и } \overline{y}_{N2} = \frac{1}{n_2}\sum_{i=1}^{n_2} y_i,$$

где y_i – значения функции в выборках, n_1 – размер выборки $N1$, n_2 – размер выборки $N2$.

Размер окон выборок целесообразно выбирать одинаковым, тогда

$$n_1 = n_2 = n.$$

Для проверки работоспособности описываемого метода можно построить математическую модель в программном пакете Simulink, приведенную на рис. 4.

В приведенной модели размер окон выборки равен 16 отсчетам, в качестве исходного сигнала также используется гармонический синусоидальный сигнал, аналогичный представленному на рис. 3, *а*. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

По результатам моделирования видно, что с применением описываемого метода удалось до-

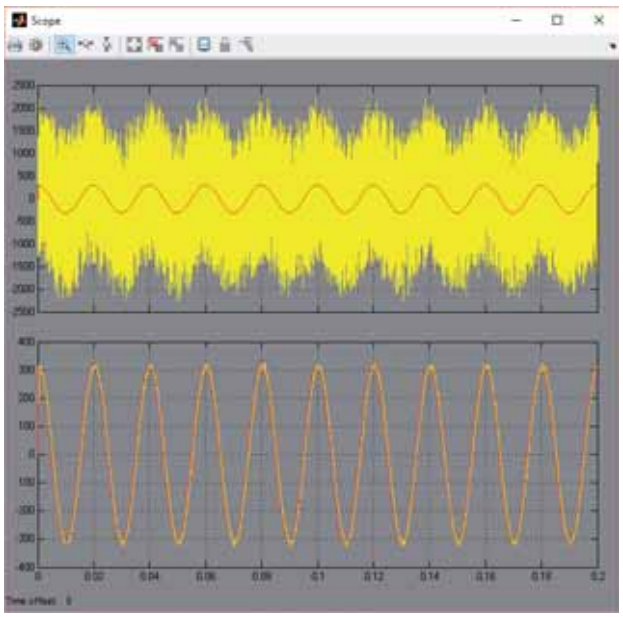


Рис. 5. Результат дифференцирования входного сигнала, вверху – классическим методом, внизу – с усреднением; красным обозначена производная незашумленного сигнала

вольно точно восстановить форму производной незашумленного сигнала.

Для проверки работоспособности метода применительно к профилю марки была собрана Simulink-модель, представленная на рис. 6, в которой профиль марки задан функцией Гаусса (рис. 7), к которой дополнительно прибавлен 3%-й шум, имитирующий шум АЦП.

В данном случае профиль марки симметричен относительно центра, результат дифференцирования классическим способом и усредняющим способом приведен на рис. 8.

По результатам моделирования видно, что вычисление производной классическим методом дало сильно зашумленный сигнал. Для обоих методов получены следующие значения абсолютной разности минимума и максимума производной:

4,76 – классическим методом;

0,54 – методом усредняющего дифференцирования.

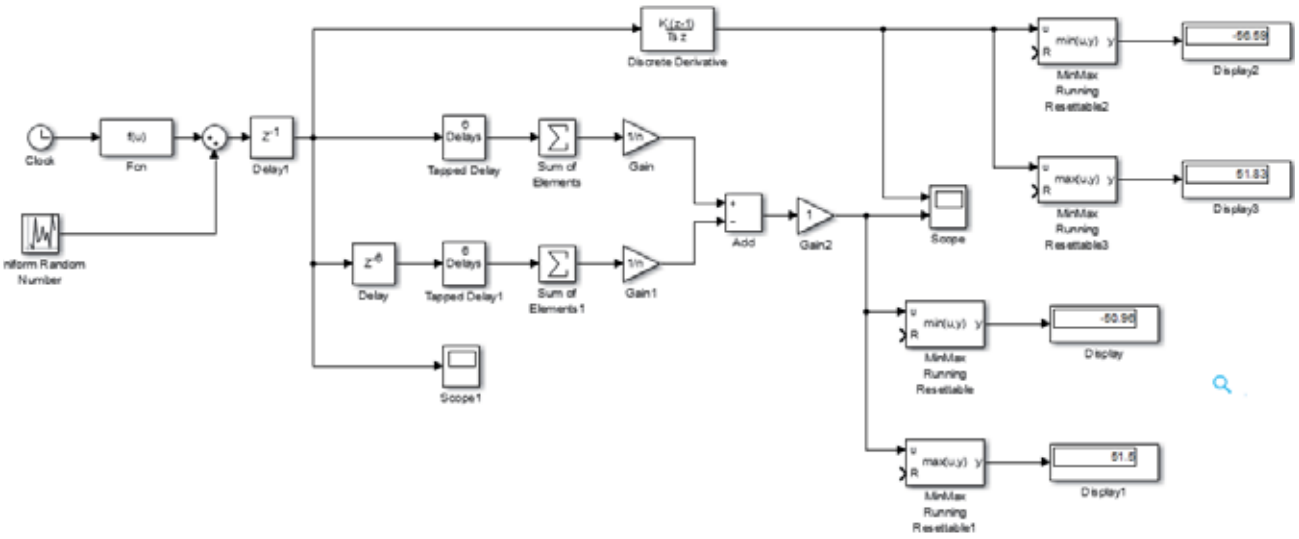


Рис. 6. Simulink-модель исследования профиля марки

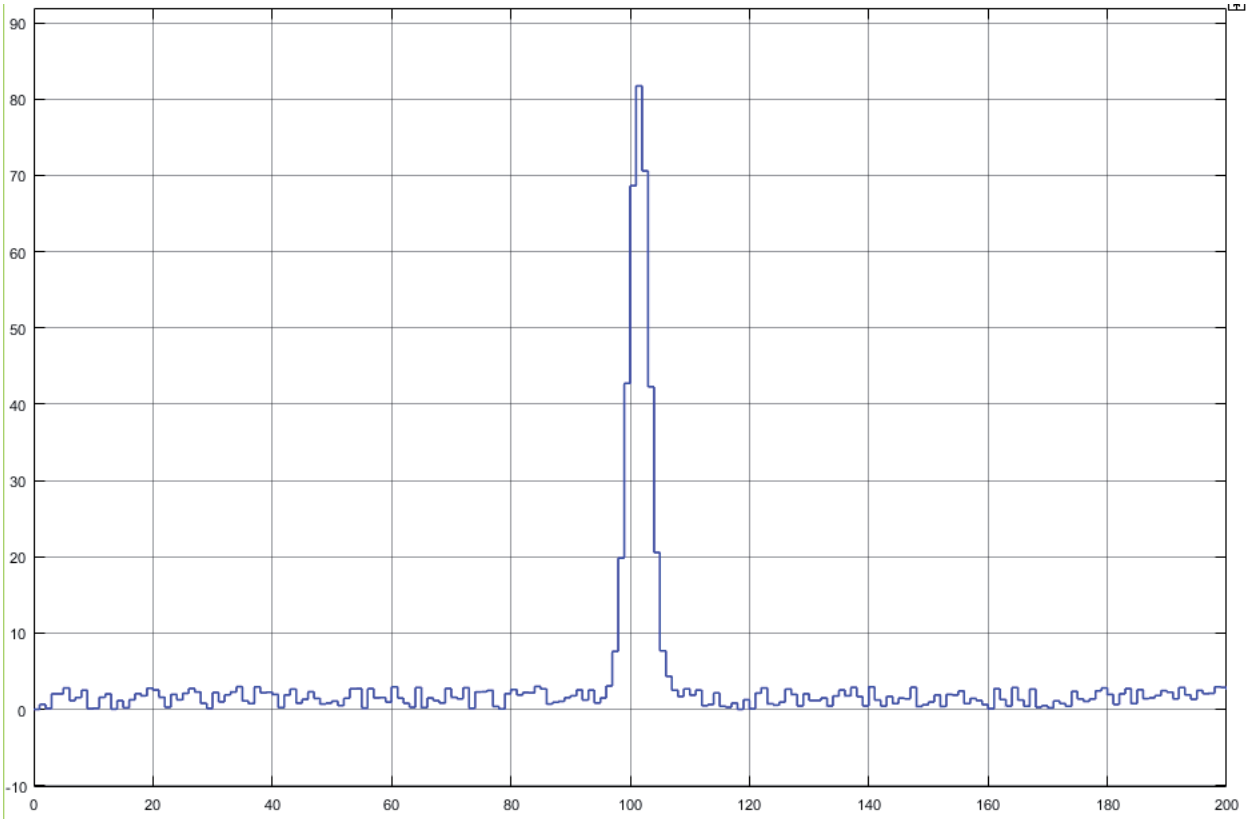


Рис. 7. Профиль исследуемой марки. Горизонтальная ось – номер пикселя; вертикальная – относительная яркость, приведенная к динамическому диапазону сенсора

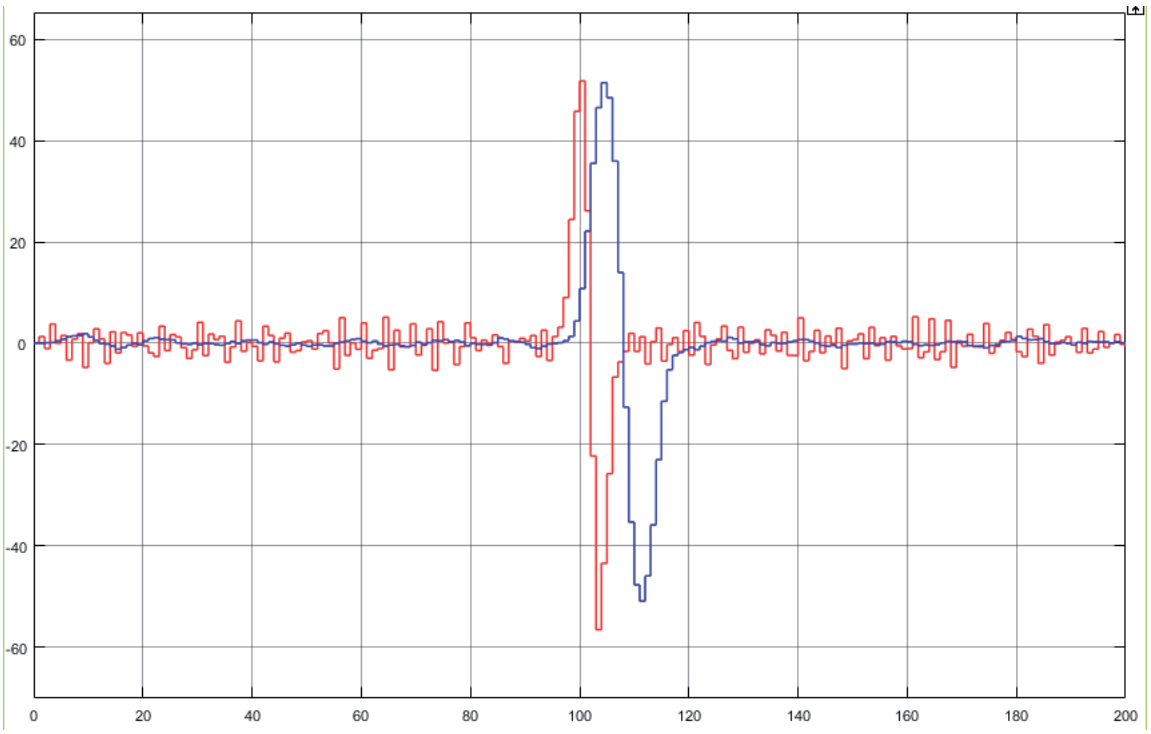


Рис. 8. Результаты моделирования

Оба метода дали разные по амплитуде сигналы, и, чтобы можно было сравнить их результаты, введем коэффициент несимметрии, равный

$$k_{\text{нс}} = \frac{|D_{\min} + D_{\max}|}{\max(|D_{\min}|, |D_{\max}|)},$$

где $D_{\min}$ – минимальное значение производной;

$D_{\max}$ – максимальное значение производной.

В случае с классическим дифференцированием коэффициент равен

$$k_{\text{нс}} = 0{,}084.$$

А в случае с методом усредняющего дифференцирования –

$$k_{\text{нс}} = 0{,}015.$$

Исследование симметричного профиля марки классическим методом численного дифференцирования дало ошибку в 8 раз больше, чем при исследовании методом усредняющего дифференцирования.

Можно установить связь между коэффициентом нелинейности и уходом координаты центра марки, вызванным несимметрией профиля. Графическая зависимость коэффициента нелинейности от ухода центра марки представлена на рис. 9, вычисления проводились для окна, равного 4.

Как видно по результатам моделирования и вычислений, предложенный метод может быть использован для выработки и оценки критериев качества изготовления фотошаблонов, используемых в автоколлимационных угломерных устройствах. Помимо этого, предложенный метод может быть использован при юстировке оптических приборов, содержащих проецируемые изображения марок, для этого алгоритм вычисления производной должен работать динамически с непрерывным отображением результатов вычислений в ходе юстировки.

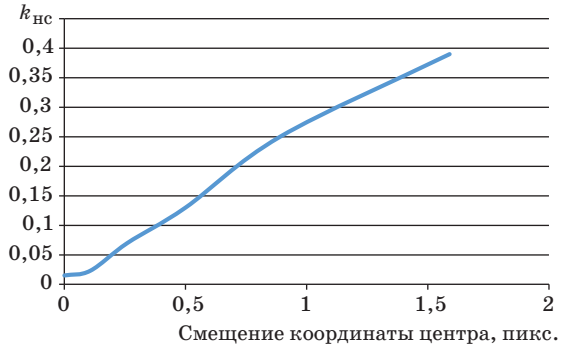


Рис. 9. Зависимость коэффициента нелинейности от смещения центра марки, вызванного несимметрией профиля

Библиографический список

1. TriAngle. Электронные автоколлиматоры для прецизионного углового измерения // TRIOPTICS GmbH. Wedel. Germany, 2015.

2. Автоколлиматоры цифровые АК-Ц. Руководство по эксплуатации. ДИАГ.401235.003РЭ // Науч.-произв. комплекс «Диагностика». СПб., 2015.

УДК 662.621.3

***А. В. Тюрюмина*[1]**
аспирант

***В. С. Секацкий*[2]**
кандидат технических наук, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и управления качеством

***А. П. Батрак*[3]**
кандидат технических наук, доцент
[1,2,3]Сибирский федеральный университет

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Важность силовых трансформаторов в системе электроснабжения требует от коммунальных служб решения следующих вопросов: как определить зарождающиеся повреждения в трансформаторе, как может быть продлен срок эксплуатации трансформатора без потери надежности, как сократить расходы. Мы предлагаем использовать метод акустической эмиссии в качестве комплексного метода диагностики в режиме реального времени. В этой статье представлены результаты измерения акустических сигналов, генерируемых наличием в трансформаторном масле примесей, и определение их влияния на состояние масла как показателя состояния всего трансформатора.

Ключевые слова: *трансформаторное масло, изоляция трансформатора, диагностика трансформатора, стратегия диагностики.*

***A. V. Tyuryumina*[1]**
Phd Student

***V. S. Sekackiy*[2]**
PhD, Tech., The Head of the Standardization, Metrology and Quality Management Department

***A. P. Batrak*[3]**
PhD, Tech., Associate Professor
[1,2,3]Siberian Federal University

USE OF ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR POWER TRANSFORMER DIAGNOSTICS

The importance of transformers in networks results in utilities having three important questions in the field of power transformer diagnostics. How can incipient faults be detected at an early stage? How can transformer service be extended without a reliability loss? How can utilities reduce maintenance costs? We propose to use the acoustic emission (AE) method as a complex online diagnostics technique to identify evolving failures. This paper considers preliminary results of measuring the acoustic signals generated by the presence of impurities in transformer oil and determining the impurities influence on its condition as an indicator of the transformer condition.

Keywords: *transformer oil, transformer insulation, transformer diagnostics, diagnostics strategy.*

Силовые высоковольтные трансформаторы играют ключевую роль в любой системе электроснабжения, но большинство из них были установлены в 60–70-е гг. XX в. В России фонд силовых трансформаторов изношен на 60–80%. Но, учитывая то, что силовые трансформаторы являются одними из наиболее дорогостоящих элементов системы, их замена в короткие сроки экономически и технически невыполнима.

В силу этого актуальным вопросом является поиск новых подходов и методов мониторинга, диагностики, оценки состояния, технического

обслуживания, ремонта и продления эксплуатации трансформаторов без потери устойчивости и надежности электрических сетей [1].

Определены всего четыре основные стратегии для проведения диагностики и ремонта силового оборудования:

1. Регламентная стратегия в России соответствует стратегии Time based maintenance за рубежом.

2. Смешанная стратегия (Scheduled or on request condition based maintenance).

3. Стратегия по отказам (Corrective maintenance).

4. Стратегия по техническому состоянию (Condition based maintenance) [2, 3, 4].

Обслуживание по техническому состоянию предполагает проведение ремонта после выявления системой мониторинга состояния зарождающегося повреждения. Это позволяет уменьшить количество аварийных ситуаций и снизить затраты на их устранение, увеличить вероятность обнаружения аварийного и, главное, предаварийного состояния оборудования, увеличить сроки эксплуатации оборудования с невыработанным ресурсом, сократить количество проверок и трудозатрат для проведения этих проверок, уменьшить количество ненужных отключений оборудования [2, 3]. Также применение стратегии по техническому состоянию позволяет сэкономить денежные средства, так как исследования показывают, что ранняя диагностика трансформаторов снижает расходы на ремонт на 75%, потери от недоотпуска электроэнергии на 63%, а ежегодная экономия составляет 2% от стоимости нового трансформатора. Подробный стоимостный анализ, представляющий собой многокритериальный процесс с несколькими индивидуальными параметрами, которые сложно оценить, приведен в [4].

В наиболее развитых странах наметились тенденции к последовательному переходу от системы планово-предупредительного ремонта к диагностике по техническому состоянию [5].

Для реализации стратегии по техническому состоянию исследуются и применяются различные методы. Одним из методов диагностики состояния силового оборудования, к которому наблюдается повышенный интерес исследователей, является изучение состояния трансформаторного масла. В этом случае трансформаторное масло как диагностическая среда позволяет выявить до 70% возможных дефектов трансформатора и является показателем состояния всего трансформатора [6].

Путем сравнения качественных характеристик трансформаторного масла [7] было проведено исследование методов диагностики состояния изоляции трансформатора в России, США и Германии. В качестве важных показаний состояния изоляции были рассмотрены плотность, содержание влаги, тангенс угла диэлектрических потерь и осадок (стабильность против окисления).

К недостаткам методов по определению данных характеристик можно отнести следующие:

1. Они не подходят для контроля состояния в режиме реального времени.

2. Отсутствует возможность комплексного контроля нескольких параметров на одном и том же оборудовании.

3. Требуется наличие высококвалифицированного персонала и специального оборудования [7].

Учитывая недостатки традиционных методов и необходимость их устранения, на наш взгляд, перспективным является исследование возможности применения акустических методов диагностики, благодаря которым обеспечивается высокая стабильность и небольшие затраты в исполнении.

Метод акустической эмиссии изучается в течение 25 лет [8] и применяется для диагностики появления частичных электрических разрядов в силовых маслонаполненных трансформаторах [10–13]. В России результаты исследований метода акустической эмиссии отражены в патентах на изобретения [14]. Наиболее близкими являются патент № 2532143 на метод определения нелинейного акустического параметра жидкостей и устройства для его осуществления [15] и патент № 2492460 на способ акустической диагностики технического состояния энергетического оборудования и устройство для его осуществления [16].

Целью нашего исследования является выявление возможности применения метода акустической эмиссии для определения влияния примесей (воды, целлюлозы и газовой фазы) на состояние трансформаторного масла как показателя состояния всего трансформатора.

В данном исследовании описывается измерение акустических сигналов, генерируемых нахождением примесей в трансформаторном масле, и анализ их амплитудно-частотной характеристики для получения информации о состоянии трансформатора.

Экспериментальная установка состоит из образца трансформаторного масла, помещенного в резервуар, двух пьезокерамических преобразователей, генератора белого шума, персонального компьютера и программного обеспечения.

Один из пьезокерамических датчиков испускает синусоидальный акустический сигнал частотой в диапазоне от 1 до 10 кГц (1; 1,2; 1,4; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 10 кГц) от эталонного генератора белого шума. Сигнал проходит через испытываемую среду (образец трансформаторного масла) ко второму пьезокерамическому преобразователю, далее передается на ПК, где формируется амплитудно-частотная характеристика для последующего анализа [17].

В качестве образцов было использовано трансформаторное масло марки Т-750 и Т-1500

Таблица 1

Содержание примесей в образцах трансформаторного масла

Примесь	Влага, %				Целлюлоза, %				Газовая фаза	
Содержание примеси	0	0,224	0,355	0,0994	0	0,06	0,18	0,31	с воздухом	без воздуха

ввиду его распространенности в России, небольшого процентного содержания сернистых соединений, повышенной стабильности к окислению, невысокой стоимости и рекомендациям к применению за рубежом.

Для проверки чувствительности метода акустической эмиссии была выдвинута гипотеза, согласно которой содержание примесей влияет на акустический спектр образца трансформаторного масла.

Для подтверждения/опровержения гипотезы было проведено сравнение акустических спектров нового и отработанного трансформаторных масел. Значительные различия акустических спектров позволили принять выдвинутую гипотезу, то есть содержание примесей в масле действительно изменяет акустический спектр образца трансформаторного масла. Следовательно, метод акустической эмиссии может быть применен для определения влияния примесей на трансформаторное масло [18, 19].

Для определения влияние примесей в образцы нового трансформаторного масла добавлялись вода, целлюлоза и газовая фаза.

Массовая доля воды [17, 20] и целлюлозы [21] измерялась в трех точках процентной шкалы массы. Полученные акустические спектры сравнивались с акустическим спектром эталонного образца масла (0% воды и целлюлозы).

Выбор диапазона обусловлен гигроскопичностью ароматизированных масел.

Исследование влияния нерастворенной газовой фазы осуществлялось при следующих условиях: температура 20 °С, время контакта масла с воздухом – 15 мин, способ ввода газов в масло – свободная конвекция. После испытания проводилась дегазация путем выдержки в течение суток в открытом сосуде [17, 20].

Данные сведены в табл. 1.

Влияние примесей на состояние трансформаторного масла было определено с помощью однофакторного дисперсионного анализа. В результате содержание влаги и целлюлозы является значимым фактором [21], а анализ процесса поглощения маслом воздуха показал изменение акустической амплитуды без изменения частотного спектра [17].

Для получения математической функции изменения мощности эталонного источника звука от содержания примесей в масле будет проведен регрессионный анализ вида

$$Y = b_0 + b_j X.$$

По результатам регрессионного анализа будет сделан вывод о том, является ли зависимость между содержанием воды и целлюлозы в образце трансформаторного масла линейной или имеет более сложный характер.

Будущие направления исследования также включают продолжение исследования влияния газовой фазы на акустической спектр трансформаторного масла, исследование комплексного воздействия примесей на качество трансформаторного масла, определение возможности использования метода акустической эмиссии для определения других характеристик масла (например, вязкости).

Библиографический список

1. *Тюрюмина А. В., Секацкий В. С., Батрак А. П.* Диагностика состояния силового трансформатора в критических условиях эксплуатации. Сложные системы в экстремальных условиях: тез. докл. XVIII Всерос. симпозиума с междун. участием; отв. ред. Р. Г. Хлебопрос, В. Г. Суховольский, О. В. Крюкова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016.

2. *Тюрюмина А. В., Секацкий В. С., Батрак А. П.* Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 3 (3). С. 245–250.

3. *Тюрюмина А. В., Батрак А. П.* Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов. Проблемы теории и практики современной науки: Матер. V Междун. науч.-практ. конф. (18 января 2016 г.): сб. науч. тр. / науч. ред. д. э. н., проф. С. В. Галичева. М.: Издательство «Перо», 2016. 156 с.

4. Experienced-Based Evaluation of Economic Benefits of Online Monitoring Systems for Power Transformers / *S. Tenbohlen, T. Stirl, G. Bastos etc.* CIGRE Session. Paris, 2002. P. 12–110.

5. Asset Management Techniqies. *J. Schneider, A. Gaul, C. Neumann etc.* 15th PSCC. Liege, 2005.

6. *Тюрюмина А. В., Батрак А. П., Секацкий В. С.* Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов в зарубежных странах // Молодой ученый. 2016. № 8 (112). С. 321–325.

7. *Батрак А. П., Тюрюмина А. В., Никитина А. В.* Сравнение качественных характеристик трансформаторных масел // Тяжелое машиностроение. 2013. № 3. С. 41–44.

8. *Батрак А. П., Тюрюмина А. В., Никитина А. В.* Акустический способ экспресс-диагностики маслонаполненного энергооборудования // Интеллект и наука: тр. XIII Междун. молодеж. науч. конф. / отв. ред. А. В. Хныкин. Железногорск: Железногор. филиал СФУ, 2013. 318 с.

9. *Boczar T.* Application of Signal Processing Elements for the Characteristics of Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges // Physics and Chemistry of Solid State. 2007. № 3. P. 610–617.

10. *Boczar T., Fracz P.* Comparison of the Measurement Results of Electrical Discharges Registered by the Acoustic Emission and Optical Spectrophotometry Methods // Physics and Chemistry of Solid State. 2006. № 3. P. 564–571.

11. *Wotzka D., Cichon A., Boczar T.* Modeling and Experimental Verification of Ultrasound Transmission in Electro Insulation Oil // Archives of acoustics. 2012. № 1. P. 19–22.

12. *Park D., Choi S., Kil G.* Measurement and Analysis of Acoustic Signal Generated by Partial Discharges in Insulation Oil // The 7th WSEAS International Conference on Power Systems. Beijing. 2007.

13. *Boczar T., Franz P.* The Application of the Correlative Analysis and the Regression Function for Determining Correlations of the Measurement Results of Acoustic Emission Generated by Partial Discharges // Acta Physica Polonica A. 2009. № 3. P. 281–284.

14. *Тюрюмина А. В., Батрак А. П., Секацкий В. С.* Анализ применения метода акустической эмиссии для диагностики силового оборудования в России и за рубежом // Молодой ученый. 2016. № 28 (132). С. 194–197.

15. Пат. 2532143 Российская Федерация, МПК G01N29/02, G01S15/88. Метод определения нелинейного акустического параметра жидкостей и устройство для его осуществления / И. В. Корсков, В. А. Буланов, П. Н. Попов; заявитель и патентообладатель Федеральное госуд. бюдж. учреждение науки Тихоокеанский океанологический ин-т им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Рос. академии наук. № 2013130643/28; заявл. 03.07.13; опубл. 27.10.14. 1 с.

16. Пат. 2492460 Российская Федерация, МПК G01N29/00. Способ акустической диагностики технического состояния энергетического оборудования и устройство для его осуществления / И. А. Кашманов; заявитель и патентообладатель Науч.-техн. центр «АРГО» (ООО НТЦ «АРГО»). № 22012108904/28; заявл. 07.03.12; опубл. 10.09.13. 1 с.

17. *Никитина А. В.* Акустический анализ свойств трансформаторных масел / *А. П. Батрак, Т. М. Чупак, А. В. Тюрюмина* // Тяжелое машиностроение. 2014. № 4–5. С. 45–46.

18. *Tyuryumina A. V.* Importance of Transformer Condition Evalution. Проспект Свободный-2016: матер. науч. конф., посвящ. году образования в Содружестве независимых государств (15–25 апреля 2016 г.). Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016.

19. *Tyuryumina A. V.* Evaluation of Transformer Condition by Acoustic Method. Проспект Свободный-2016: матер. науч. конф., посвящ. году образования в Содружестве независимых государств (15–25 апреля 2016 г.). Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 55–58 с.

20. *Батрак А. П., Тюрюмина А. В., Никитина А. В.* Акустическая диагностика как показатель качества свойств трансформаторных масел // Интеллект и наука: тр. XIV Всерос. молодеж. науч. конф. с междун. уч. / отв. ред. А. В. Хныкин; Железногор. филиал СФУ. Железногорск, 2014. 276 с.

21 *Батрак А. П., Тюрюмина А. В., Никитина А. В.* Факторный анализ качественных характеристик трансформаторного масла. Молодежь и XXI век: матер. V Междун. молодеж. науч. конф. (26–27 февраля 2015 г.) в 3 т., Т. 3. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. Университетская книга. 2015. 259 с.

УДК 628.34.661.183.6

Т. И. Фомичева
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОЧИСТКА РАСТВОРОВ ОТ НЕОРГАНИЧЕСКИХ АНИОНОВ ПРИРОДНЫМИ ЦЕОЛИТАМИ

T. I. Fomicheva
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SOLUTION PURIFICATION FROM INORGANIC ANIONS WITH NATURAL ZEOLITES

The article presents the data of natural zeolites use for inorganic ions sorption.
Keywords: *zeolite, clinoptilolite, inorganic ions sorption.*

Природные цеолиты являются высококремнистыми молекулярными ситами, которые представляют значительный интерес ввиду ряда особенностей их свойств. Они являются алюмосиликатами щелочных и щелочно-земельных металлов. Ярко выраженная микропористость (сорбционные каналы 2–9 ангстрем) природных цеолитов определяет специфику адсорбционного процесса в этих системах.

Природные сорбенты широко используются в настоящее время как в экологических целях [1] для очистки питьевой воды и обедненных промышленных стоков, так и в медицине. В качестве природных сорбентов нами были испытаны ранее активные угли на основе торфа и технических лигносульфонатов [2, 3], сорбенты на основе лигнина [4], модифицированная скорлупа кедровых орехов [4]. Эффективными сорбентами являются и природные минералы – цеолиты [6].

Природные цеолиты, и особенно клиноптилолиты, были исследованы в процессах сорбции неорганических катионов из растворов [7], очистки отходящих газов от диоксида серы, тонкой очистки хлора и разнообразных кислых сред, модифицирования и структурирования резин.

Применение в сельском хозяйстве является одним из сравнительно новых направлений, особенно в области изготовления сорбентов для тепличных хозяйств.

Одно из направлений использования цеолитов – очистка сточных вод от особо токсичных примесей, одной из которых является фтор, образующийся, в частности, при производстве минеральных удобрений.

Поглощение фосфора из растворов сокирницким клиноптилолитом. Цеолиты являются дешевым и высокоэффективным материалом, у которого после обработки, например, нагреванием до 60 °С существенно повышается сорбционная емкость [8, 9].

Сорбцию соединений фосфора цеолитом исследовали при температуре 50 °С. Цеолит измельчали до различных фракций: 2 мм, 3 мм, 5 мм и 6 мм. Время опытов составляло от 1 до 3 часов. Исходный раствор фосфорной кислоты содержал 10% H_3PO_4.

Сорбент смешивали с раствором в соотношении Ж:Т = 5:1 и затем отфильтровывали. Твердую фазу подвергали анализу. Анализ на содержание фосфора осуществляли фотометрическим методом.

Результаты представлены в табл. 1.

Уменьшение величины фракции увеличивает степень поглощения фосфат-иона. Показано существенное поглощение фосфатов природным цеолитом.

Извлечение фтора из растворов с помощью природных цеолитов.

Опыты по извлечению фтора из растворов проводим в периодических условиях при температуре 20°, 40° и 60 °С и соотношении Ж:Т = 5:1. Однократная обработка растворов цеолитом Сокирницкого месторождения позволила выде-

Таблица 1

Поглощение фосфора из 10%-го раствора сокирницким клиноптилолитом

Фракция клиноптилолита, мм	Содержание P_2O_5, %		
	Время опыта, мин		
	60	120	180
2	4,15	4,84	5,62
3	3,24	4,1	4,52
5	2,28	2,76	3,09
6	1,88	2,05	2,54

Таблица 2

Поглощение иона фтора из водных растворов природным цеолитом

№ п/п	Содержание фтора, % вес	
	В исходном растворе	В конечном растворе
1	0,3	0,028
2	0,5	0,065
3	1,0	0,14
4	2,0	0,25

лить фтор лишь частично. Поэтому была испытана многократная очистка раствора фтора в несколько циклов. Модельные растворы изготавливали из фтороводородной кислоты.

Растворы, содержащие более 2% фтора, удалось очистить до содержания 0,4–0,6% F за шесть циклов очистки.

Повышение температуры, особенно для сравнительно более концентрированных растворов, оказывает отрицательное влияние на скорость очистки от фтора.

Раствор, содержащий более 2% фтора, удалось очистить до содержания 0,4–0,6% фтора.

Таким образом, природные цеолиты могут быть использованы для извлечения иона фтора из растворов, причем наиболее целесообразно осуществлять очистку в 3–4 цикла.

Выводы:

1. Сокирницкий клиноптилолит может быть использован для извлечения фосфат-иона из растворов. Сорбционная способность повышается при уменьшении размера гранул цеолита.

2. Очистка растворов от иона фтора может быть проведена успешно при помощи природного цеолита, содержание F снижается в ~10 раз за 3 цикла очистки.

Библиографический список

1. *Челищев Н. Ф., Володин В. Ф., Вейсгейм А. С.* Применение сахаптинского цеолита для улучшения качества воды питьевого назначения // Известия Томского политехн. ун-та. 2011. Т. 319. № 3. С. 28–31.

2. *Фомичева Т. И., Колужникова Е. В.* Получение активного угля из торфа и технических лигносульфонатов. XI Всероссийская конф. по проблемам науки и высшей школы. Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 203 с.

3. Influence of Technical Lignosulphonateon Porous Structure of Active Carbone Produced from Peat / *T. Fomicheva, G. Busanova, Y. Fomichev etc.* 12th International Congress Phitopharm. St. Peterburg, 2–4 July, 2008. 39 p.

4. *Fomicheva T. I., Koluzhnikova E. V., Fomichev J. S.* Lignine Active Coals Used for Purification of Solutions from Inorganic Cations. 13th International Congress Phitopharm 2009. Germany, Bonn, July, August, 2009. P. 39–40.

5. Сорбционные свойства шрота семян сосны кедровой сибирской / А. Н. Шиков, Т. И. Фомичева, Г. Н. Бузанова, О. Н. Пожарицкая. V Междунар. съезд «Актуальные проблемы создания новых лекарственных препаратов природного происхождения» (5–7 июля 2001 г.). Матер. съезда. СПб., 2001. С. 142–144.

6. *Fomicheva T., Fomichev Ju., Belkina E.* Use of Natural Zeolites for Dissolved Solution Cleaning. 15th International Congress Phitopharm. Nuremberg, Germany, 25–27 July, 2011.

7. *Hamdi N., Srasra E.* Removal of Phosphate Ions from Aqueous Solution Using Tunisian Clays Munerals and Synthetic Zeolite // Journal of Environmental Sciences. 2012. V. 24. № 4. P. 617–623.

8. Кислотное модифицирование клиноптилолита как способ изменения его молекулярно-ситовых свойств / *Н. П. Морева* и др. М.: Московский химико-технологический институт, 1983. 10 с.

9. *Torii K.* Jn: Natural Zeolites. Occurence, Properties, Use. Pergamon Press, 1978. P. 441–450.

УДК 338.45; 338.462; 332.133.4

Д. А. Андреева
кандидат экономических наук
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

А. М. Малинин
доктор экономических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный экономический университет

ТОВАРНО-СЕРВИСНАЯ ДУАЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕГИОНА

В статье рассматривается (формулируется) понятие товарно-сервисной дуальности электрической энергии как продукта и одновременно как услуги электроэнергетической системы для региона, демонстрируются (описываются) условия, при которых электрическая энергия реализуется как продукт или как услуга в региональной социально-экономической системе.

Ключевые слова: *электроэнергетика, дуальность, продукт, услуга, регион.*

D. A. Andreyeva
PhD, Economic
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

A. M. Malinin
Dr. Sc., Economic, Professor
St. Petersburg State University of Economics

COMMODITY AND SERVICE DUALITY OF ELECTRIC POWER IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEM OF THE REGION

The article considers the concept of commodity and service duality of an electrical energy as product and, at the same time, as services of electrical power system for the region, it is shown conditions under which the electrical energy is implemented as a product or as service in regional social and economic system.

Keywords: *power industry, duality, product, service, region.*

Вспомним некоторые экономические понятия. Благом называется способность предметов удовлетворять потребности человека [1]. Необходимо отделить экономические блага от общего многообразия благ. Экономические блага – это ограниченные количественно материальные и нематериальные предметы, точнее, свойства этих предметов, способные удовлетворять экономические потребности человека. Важнейшими свойствами экономического блага являются ценность и стоимость [1].

Большинство известных нам благ являются экономическими просто потому, что эти блага требуют производства, которое является частью экономики.

Категория «благо» исторически и логически предшествует категории «товар», которая является центральной категорией теорий товарного производства.

Товар – это экономическое благо, произведенное для обмена. К. Менгер [2] утверждал, что экономическое благо становится товаром независимо от его способности к передвижению, независимо от лиц, предлагающих его для продажи, от его материальности, независимо от характера его как продукта труда, поскольку обязательно предназначено для обмена. Товар как таковой обладает двумя свойствами:

– способностью удовлетворять какую-либо человеческую потребность;

– пригодностью к обмену.

Особое место среди благ, необходимых человеку, занимают услуги.

Услуги – это целесообразная деятельность человека, результат которой имеет полезный эффект, удовлетворяющий какие-либо потребности человека.

По Б. А. Райзбергу [3, стр. 15], «производство услуг означает их создание как продукта, обладающего количественными и качественными параметрами, пригодного для удовлетворения потребностей в услугах, потребления услуг. В своей определенной части производство услуг перекрывается, обеспечивается производством материально-технического продукта, создающего возможность последующего оказания услуг». И далее у него же: «услуги – это вид целенаправленной, адресно ориентированной деятельности одних людей и организаций, призванной удовлетворить проявившиеся, заявленные потребности, выраженные запросы других людей и организаций посредством осуществления востребованных действий и получения результатов, в которых нуждаются потребители [3, стр. 27]».

Очевидно, что процесс генерации (генерирования), транспортирования и потребления электрической энергии, в зависимости от конкретной ситуации взаимоотношений в паре производитель – потребитель, может быть рассмотрен либо как процесс товарного производства, либо как акт оказания услуги.

Рассмотрим конкретные ситуации на примере региональной системы энергоснабжения.

Экономические отношения в регионе могут рассматриваться в двух аспектах [4–6]:

– с одной стороны, экономика региона является частью национальной экономики, локализованной на территории региона, и деятельность ее направлена на производство ВРП;

– с другой стороны, региональная экономика является реализацией экономической стратегии (планов) социально-экономического развития региона, и деятельность ее направлена на повышение качества жизни населения региона.

С точки зрения экономики региона электрическая энергия (включая генерацию, передачу и реализацию) для нужд производства как основного, так и вспомогательных подразделений является частью производственного процесса и, таким образом, выступает в роли товара, участника товарного хозяйства, где «...связь производителей и потребителей осуществляется через куплю-продажу товаров» [7].

В данном случае электрическая энергия обладает всеми признаками товара, в том числе является продуктом труда, имеет стоимость, образованную вложенным в товар общественным трудом, функциональное назначение и т. д. [7].

Распределение, рыночная реализация электрической энергии происходят в соответствии с изменениями, колебаниями уровней спроса-предложения [8], что проявляется, например, регулированием, диспетчеризацией потоков электрической энергии в периоды «пиковых» нагрузок, «веерными» отключениями потребителей в ситуации невосполнимого дефицита электрической энергии в регионе, межрегиональным перераспределением электрической энергии через Центральную диспетчерскую службу РАО ЕЭС и другие службы в соответствии с действующей нормативно-правовой базой[1].

С точки зрения региональной экономики электрическая энергия является, как правило, инструментом повышения качества жизни населения и потребляется в основном как услуга. Так, например, услуга электрификации сельских поселений резко повышает качество жизни и улучшает условия труда местного населения.

Обычно услуга доступа к электрической энергии предоставляется в составе какой-либо комплексной услуги, например, в состав услуги ЖКХ входят услуги освещения, связи, функционирования бытовых приборов, лифтового обслуживания и пр. Все эти услуги возможны только при условии наличия электрической энергии, которая и сама для конечного потребителя – домохозяйства[2] – выступает в качестве услуги.

Нужно отметить, что некоторые услуги ЖКХ могут быть предоставлены на основе конкурентных энергоносителей, например, услуга горячего водоснабжения может быть реализована как через ТЭЦ, так и при помощи газовых или электрических нагревателей, так же как и кухонные плиты могут быть как газовыми, так и электрическими, однако все-таки большинство «энергозависимых» услуг ЖКХ работают на электрической энергии.

На основе электрической энергии населению региона предоставляется большой объем транспортных услуг – суммарный объем внутригородской перевозки граждан трамваями, троллейбусами и (особенно!) метрополитеном составляет в Санкт-Петербурге почти 80% внутригородских пассажирских перевозок.

Рекреационные услуги, по определению являющиеся комплексными, также в больших объемах предоставляют услуги, связанные с потреблением электрической энергии [9]: это и проживание в гостиничных комплексах, которые являются субститутами постоянных мест проживания практически с тем же набором электрических приборов и устройств, что предоставляет ЖКХ, и услуги информации и связи, и очень популярные услуги СПА-салонов и т. д.

[1] См., например, ТП «О службе средств диспетчерского и технологического управления ПЭО», ТП 34-00-006-84 «Служба передового опыта и информации Союзтехэнерго Министерства энергетики и электрификации СССР. Москва 1985» или «Положение об объединенной диспетчерской службе по автоматизированному контролю и управлению инженерным оборудованием в жилищном фонде города Москвы» (2004 г.).

[2] Домохозяйство – хозяйствующий субъект, состоящий из одного или более лиц (семьи), который снабжает экономику ресурсами и использует полученные за них деньги для приобретения товаров и услуг, удовлетворяющих материальные потребности человека [7].

И, наконец, почти в каждом доме есть компьютеры и почти у каждого человека, особенно у горожан, есть те или иные электронные гаджеты, для зарядки и функционирования которых также используются услуги электроэнергетики.

Таким образом, мы продемонстрировали, что электрическая энергия может выступать как в роли товара, так и в роли услуги, то есть имеет место товарно-сервисная дуальность электрической энергии в социально-экономической системе региона.

Критерием для отнесения электрической энергии к разряду товара или услуги служит вид конечного потребителя – если это предприятие, организация или иной участник производственного процесса на территории региона (участник производства ВРП), то электрическая энергия является товаром, если же конечным потребителем является домохозяйство или отдельный гражданин, то электрическая энергия выступает в роли услуги.

То есть электрическая энергия в ваш личный компьютер, стоящий у вас дома, поступает в виде услуги, а в такой же точно компьютер, стоящий на вашем рабочем столе по месту вашей работы, – в виде товара.

Еще один пример товарно-сервисной дуальности электрической энергии: если вы работник-надомник, то в тот промежуток времени, когда вы выполняете служебные функции, потребляемая электрическая энергия является товаром, и ее стоимость должна компенсироваться нанимателем, в остальное время электрическая энергия является услугой и оплачивается в составе комплексной услуги ЖКХ.

Библиографический список

1. Краткий словарь: инновационная экономика и экономическая безопасность / И. А. Максимцев, А. И. Буркин, Л. П. Кураков и др.; под общ. ред. Л. П. Куракова. М.: Изд-во ИАЭП, 2012. 656 с.

2. *Добрынин А. И., Тарасевич Л. С.* Экономическая теория: учебник для вузов, 4-е изд. СПб.: Питер, 2017. 560 с.

3. *Райзберг Б. А.* Введение в экономику услуг: моногр. М.: НОУ ВПО «МПСУ», 2014. 152 с.

4. *Гранберг А. Г.* Основы региональной экономики: учебник /А. Г. Гранберг. М.: ИНФРА-М, 2004. 340 с.

5. *Сигов И. И.* Теоретические и понятийные основы региональной экономики (российский опыт): 2-е изд., доп. М., 2005. 368 с.

6. *Райзберг Б. А., Лозовский Л. Ш.* Экономика и управление: словарь. М.: МПСИ, 2005. 488 с.

7. *Золотогоров В. Г.* Экономика: энцикл. словарь, 2-е изд., стереотип. Минск: Книжный дом, 2004. 720 с.

8. *Малинин А. М., Чистович А. С., Эмиров И. Х.* Энергетическая безопасность и живучесть систем теплоснабжения // Технико-технологические проблемы сервиса. 2013. № 1 (23). С. 74–83.

9. *Малинин А. М., Михайлов В. А.* Качество туристских услуг и Франкфуртская таблица по снижению цен на поездки (водные транспортные путешествия) // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. 2009. № 2 (2). С. 145–152.

УДК:338.45 УДК: 620.9

Г. С. Армашова-Тельник
кандидат экономических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРОЦЕССНО-ЦЕЛЕВОЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ В МЕХАНИЗМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОИНЖИНИРИНГОВОЙ КОМПАНИЕЙ КАК ДЕТЕРМИНАНТА РОСТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В статье рассматривается инструментарий роста эффективности функционирования энергоинжиниринговой компании.

Ключевые слова: *процессно-целевой инструментарий, механизм управления энергоинжиниринговой компанией, эффективность функционирования.*

G. S. Armashova-Telnik
PhD, Economic
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROCESS-TARGET TOOLS IN THE MECHANISMS OF MANAGEMENT OF THE ENERGY-ENGINEERING COMPANY AS A DETERMINANT OF THE GROWTH OF THE EFFICIENCY OF ITS FUNCTIONING

The article toolkit of growth of efficiency of functioning of power engineering company is considered.

Keywords: *process-target toolkit, the management mechanism of the energy-engineering company, the efficiency of the operation.*

Для современной методологии менеджмента субъектов хозяйствования в сфере энергоинжиниринга характерна высокая степень вероятности исполнения различного рода сопутствующих деятельности рисков, что отрицательно влияет на экономические показатели функционирования предприятия. Специфика проектной реализации в сфере энергоинжиниринга определяется ассортиментным содержанием предоставляемых услуг, что, в свою очередь, предполагает высокую степень факторного влияния качественного характера производимого продукта на безубыточность функционирования энергетической системы в совокупности.

Применение процессно-целевого инструментарного комплекса в процессе управления энергоинжиниринговым предприятием предоставляет ему возможность минимизировать степень потенциальных угроз, обеспечивает оптимизацию принятия управленческих решений. Отсутствие же целевых ориентиров, «вшитых» в процессные механизмы, представляет невозможным проведение аналитических, измерительных и оценочных действий относительно эффективности функционирования предприятия, исключает видение его потенциальных ресурсных возможностей.

Субъектам-участникам инвестпроекта (на стадии планирования/разработки/реализации) целесообразно использовать предлагаемый процессно-целевой инструментарный комплекс в определенной связи: соотносить параметрическое содержание услуг со специфическими свойствами предприятия и ожидаемым (планируемым) результатом. Так, параметрически-критериальная линейка производимого продукта может включать в себя взаимоудовлетворяющий стороны ценовой диапазон договора о предоставлении услуги, приемлемость относительно сроков исполнения, квалитативность выполненных работ, обязательства послесервисного сопровождения, минимизацию рекламационных требований, увеличение показателей производительности. Характерная специфичность энергопредприятия конкретного энергоинвестпроекта отражается в квалификационном уровне специалистов, в оптимизированной (сообразно энергоинжиниринговой деятельности) организационной управленческой структуре, технологической обеспеченности процессов, следовании принципам стандарта ISO 9000, «PM», применении вариативности форм производимых услуг (под ключ, разделение по видам необходимых для клиента услуг и т. д.), финансово-экономиче-

ской устойчивости (частные показатели, состояние в совокупности), наличии успешно реализованных объектов, привлекательном имидже предприятия. Планируемый «выход» продукта по завершении энергоинвестпроекта, кроме роста финансово-экономических показателей, обеспечивает предприятию повышение конкурентоспособности, увеличение доходности, потенциальную занятость на рынке энергоинжиниринга, что в общем является целевым ориентиром при функционировании субъекта хозяйствования.

Кроме того, степень факторного воздействия при использовании процессно-целевого инструментария определяется специфическим характером производимых услуг в сфере энергоинжиниринга (относительно иных сфер деятельности): дуальностью энергоинжиниринговой сущности (производство услуг в промышленной сфере); высокой квалификацией специалистов, которая является обеспечением квалитативности производимого продукта, реализации инвестпроекта; функциональной и проектной доминантностью в управленческих системах; многосложным технологическим и организационным механизмом исполнения инвестпроектов; единичным выстраиванием технологического процесса (под проект, под объект); широким ассортиментным диапазоном форм и видов производимых работ.

Отметим, что при применении процессно-целевого инструментарного комплекса в контексте реализации энергоинвестпроекта необходимо учитывать предлагаемую определенную последовательность предварительного аналитического обзора функционирования предприятия.

Так, необходимо рассматривать содержание ценностных ориентиров энергопредприятия: формы, виды, степень участия в энергоинвестпроектах (в различных объемах проектирование, комплектация оборудования, исполнение функционала по электромонтажу, наладке, изготовление шкафов релейной защиты и автоматики (РЗА) и автоматизированные системы управления (АСУ), ввод в эксплуатацию, производство комплекса инжиниринговых услуг); моделируемые партнерские связи (производство технологического оборудования, соответствующие соглашения, клиентская база); контракты по субподряду проектных и монтажных работ (тендерный отбор); конструирование, реализацию, реконструкцию, трансформацию, технологическое обновление тепло-, электроэнергетических объектов; адаптированную управленческую структуру; применение различных средств конструирования; максимизацию ресурсного использования (человеческий ресурс, техническое, методическо-измерительное обеспечение). Проанализировать направления продвижения производимой продукции: электронные торговые площадки, реализацию, участие в тематических конференциях, отраслевых выставках (различного территориально-районированного характера), использование средств массовой информации, адресных рекламных проектов, включение в тематические ассоциации, партнерские отношения. Изучить статус, степень участия целевых аудиторных групп и коммуникативные механизмы взаимодействия с клиентской аудиторией (электронные торговые площадки, маркетинговые подразделения предприятия).

В рамках реальной финансовой модели оценить структуру доходов относительно видов работ (наладка, проектирование, изготовление и комплектация оборудования, производство услуг по электромонтажу и услуг иного специального содержания) и оборудования (электроэнергетическое, теплоэнергетическое, автоматизированных систем измерения электроэнергии, учета потребления и сбыта электроэнергии, диспетчерского управления, контроля и учета энергопотребления), структуру затрат, отражающую расходы на приобретение и эксплуатацию оборудования, оплаты работ по договорам субподряда, затрат на заработную плату и сопутствующие выплаты, использование оргтехники, транспортные расходы, а также финансово-поточную схему (взаимосвязи производителей, субподрядчиков, генподрядчиков, клиентов).

Кроме того, применение предлагаемого процессно-целевого инструментарного комплекса предусматривает реализацию в адаптированной для энергоинвестпроекта управленческой системе при соблюдении ряда сформированных принципов: открытости процессной системы на протяжении всего жизненного цикла производства услуги; организации подразделенческих структур в рамках реальной системы управления сообразно рыночным направлениям (сегментам); формировании функциональной структуры для снабжения производства необходимым количественным и квалитативным человеческим ресурсом (включая обучение персонала, аттестационные и адаптационные мероприятия), эффективном использовании его потенциала, максимальной конкретизации в описании схем взаимодействия служб, оптимальном распределении материально-технических потоков обеспечения всех подразделений энергопредприятия, наличии методической насыщенности реализуемых работ и процессов, акцентировании (при реконструкции организационной структуры управления) на компонентах матричной (относительно профильных подразделений) и функциональной (для административно-хозяйственных звеньев) структур; создании «банка» инноваций (знаний, технологий), порядке накопления и применения.

Фазовая последовательность использования в управленческом механизме функционирования энергоинжиниринговых субъектов хозяйствования предлагаемого процессно-целевого инстру-

ментарного комплекса предусматривает на этапе создания совокупной системы процессов их детальную конкретизацию, регламентационное описание, аналитический обзор и оптимизационные альтернативы каждого процессного (в соответствии с целевой ориентацией) элемента; на этапе формирования системы управления процессами: определение «владельца» каждого процесса, описание границ круга полномочий и ответственности, выработку системы показателей (параметрической линейки) для возможности анализа эффективности функционирования процессов.

Таким образом, эффективность функционирования механизмов управления энергоинжиниринговой компанией определяется в том числе минимизацией потенциальных угроз посредством учета характерных (ресурсных, отраслевых, технологических) особенностей предприятия, параметрических критериев достижения (в едином процессе), специфических принципов реализации управления, что обуславливает успешную реализацию целевых ориентиров энергоинвестпроектов.

Библиографический список

1. *Блинов А. О., Угрюмова Н. В.* Современные модели управления компанией: процессный подход. М.: Финансовый ун-т при Правит. Российской Федерации. 1–3 (42–3) // Экономика и предпринимательство. 2014. С. 12–19.

2. *Беззубцева М. М., Гулин С. В., Пиркин А. Г.* Менеджмент и инжиниринг в энергетической сфере промышленного комплекса // Международный журнал экспериментального образования. М. 2015. № 12–1. С. 33–38.

3. *Гукасова Н. Р.* Инструменты повышения энергоэффективности российской промышленности // Статистика и экономика. М. 2015. № 1. С. 43–31.

УДК 621

А. Н. Зубкова
старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РИСК-МЕНЕДЖМЕНТ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ

В статье рассматриваются группы рисков, выявленных на предприятиях электроэнергетики, а также проводится анализ проблем риск-менеджмента в процессе функционирования энергетических компаний в условиях либерализации отрасли.
Ключевые слова: *риск-менеджмент, электроэнергетика, риски.*

A. N. Zubkova
Senior Lecturer
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RISK MANAGEMENT IN THE PROCESS OF FUNCTIONING OF ELECTRIC POWER COMPANIES

The article discusses the risk groups identified in the electricity industry, as well as the analysis of problems of risk management in the operation of energy companies in a liberalized industry.
Keywords: *risk management, electric power companies, the risks.*

Электроэнергетика представляет собой жизнеобеспечивающую сферу экономики, продукция которой создает необходимые и обязательные условия для развития производительной силы экономики страны в целом.

Происходящие на данный момент в энергетике страны крупные изменения повлияли на появление новых групп рисков, без учета которых невозможно развитие эффективной деятельности электроэнергетических компаний [1]. Среди них можно выделить следующие:

1. Рыночные риски. Данные риски показывают несоответствующий уровень опыта всех участников рынка электроэнергетики, который сам по себе является достаточно сложным. Договорные соглашения должны быть сбалансированы и организованы в текущем времени, т. к. электроэнергия не имеет возможности храниться, в отличие от остальных энергоносителей. Также к данной категории рисков можно отнести значительное влияние на формирование цены сезонных и местных графиков потребления, что вызывает сильную неопределенность относительно участников конкурентного рынка, вследствие чего появляются и финансовые риски. А поскольку электроэнергетические компании в большей степени могут быть подвержены рыночным рискам, то есть вероятность обнаружить неисполнение договорных обязательств между участниками рынка, значительное изменение цен и т. п. С целью снижения отрицательного воздействия рыночных рисков на предприятия сферы электроэнергетики следует воспользоваться рядом способов управления, представленных на схеме 1.

Так, производные финансовые инструменты на рынке предоставляют возможность предприятию достаточно эффективно управлять собственными рисками, а также анализировать рынок цен и прогнозировать финансовое развитие. Прямые договорные отношения между продавцами и покупателями относительно поставки электроэнергии с точными фиксированными ценами также способствуют снижению рисков. К одним из недостатков данного метода относятся сложность определения условных договорных

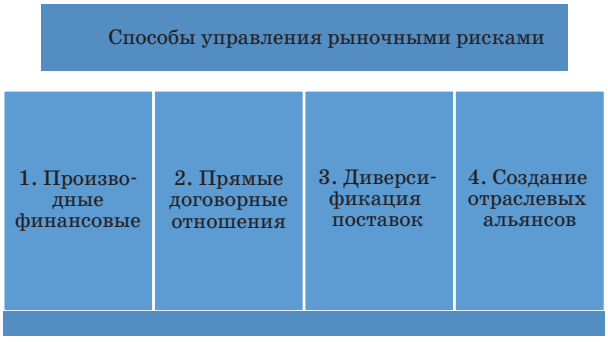


Схема 1. Способы управления рыночными рисками

цен, сложности поиска обязательных и эффективных поставщиков и вероятность риска неисполнения договорных обязательств. В случае диверсификации поставок есть возможность распределить совокупный риск на больший объем поставщиков путем покупки необходимых объемов электроэнергии по частям в различных секторах рынка. В данном случае может существовать проблема определения оптимальной структуры поставок на основании оценок относительных величин рисков, которые исходят от разных контрагентов. Это предполагает создание определенной информационной базы по поставщикам и требует значительных финансовых затрат, а также высококвалифицированной работы менеджеров. Создание отраслевых альянсов промышленных предприятий может позволить осуществить профессиональное управление всеми видами рисков на рынке и поспособствовать их эффективной деятельности на энергетическом рынке с учетом конкуренции [4].

2. Топливные риски. Данный вид рисков может определяться из цены на топливо и возможного его приобретения в нужное время в определенных количествах. В данном случае для электроэнергетических компаний может возникнуть дополнительный риск, выраженный неопределенностью при создании рынка газа и требуемого резерва генерирующих мощностей для полноценного электроэнергетического рынка.

3. Риски функционирования электроэнергетики, выраженной через нестабильную и незавершенную нормативно-правовую базу. В данном пункте следует отметить, что ключевым элементом остается ориентирование предприятия в своей деятельности на устоявшиеся строгие правила и положения, которые являются важным составляющим, определяющим степень доверия к рыночным структурам и надежности среди участников всего рынка.

4. Нефинансовые риски. Подобные риски выражаются на предприятиях, стремящихся провести политику реформирования, которые рискуют в данном случае получить отрицательный эффект. В связи с этим управление нефинансовыми рисками должно определяться использованием процедур принятия решений по оптимизации рисков. Следует отметить, что сейчас в процессе реформирования соответствие интересов обеспечивается с помощью сотрудничества с государственными органами власти, инвесторами и потребителями.

Поскольку обеспечение долгосрочной устойчивости электроснабжения является ключевым моментом в развитии энергетической политики на государственном уровне, то и система управления рисками в отрасли электроэнергетики должна быть задачей государственной важности [2].

Одним из центральных положений по долгосрочному (стратегическому) управлению на предприятии можно выделить риск-менеджмент. Риск-менеджмент включает в себя программу по контролю за исполнением поставленных задач, методы оценки эффективности производимых работ и мероприятий и систему поощрения на всех уровнях компании в виде единой системы управления.

Риск-менеджмент привлекает все большее внимание со стороны экспертов в качестве инструмента управления, поскольку степень распространения рисков имеет тенденцию к увеличению. В сфере электроэнергетики в данной ситуации задача построения новой, наиболее эффективной модели по управлению рисками становится наиболее актуальной. В отдельности каждое предприятие стремится найти свою модель внедрения риск-менеджмента, основываясь на базовых принципах построения системы.

При этом роль риск-менеджмента в процессе функционирования энергетических компаний в условиях либерализации отрасли становится все более актуальной. Так, в международной практике наиболее оптимальной в области построения внутреннего контроля на предприятии является модель COSO (частная добровольная организация, созданная в США, предназначенная для выработки соответствующих рекомендаций для корпоративного руководства по важнейшим аспектам организационного управления, внутреннего контроля, управления рисками компаний и противодействия мошенничеству). Согласно данной модели, руководство компании должно идентифицировать потенциальные события, которые могут воздействовать на способность объекта достигать поставленных целей. События с потенциально отрицательным воздействием представляют собой риски, требующие оценки и управления [3].

Общая модель COSO включает следующие элементы контроля:

– выявление рисков и целей контроля – своевременное выявление рисков, распределение полномочий по управлению ими и установление четких целей контроля;

– среду внутреннего контроля – повышение осведомленности сотрудников об управлении рисками. Система внутреннего контроля должна быть частью корпоративной культуры;

– процедуры внутреннего контроля – процедуры, обеспечивающие полный и точный учет операций, соблюдение требований законодательных и нормативных актов, надежность обработки данных и целостность информации;

– информацию и информирование – получение своевременной, достоверной и адекватной информации по рискам. Контрольная информация должна передаваться заранее определенным получателям из числа руководства;

– мониторинг и корректировку – выявление изменений внешних и внутренних условий дея-

тельности, требующих соответствующих модификаций процедур внутреннего контроля, выявления недостатков и осуществления корректировок [3].

Проведенные в России опросы западными компаниями, такими как AIG, AON, March, Willis, показали, что риски ведения бизнеса существенно выше средних показателей для стран с обустроенной экономикой. Средним нормальным показателем рисковой обстановки считается значение 50 по 100-балльной шкале, так, в России результаты опроса показали средние значения на уровне 65–70 баллов. Все эти оценки доказывают, что российская экономика нуждается в развитой инфраструктуре риск-менеджмента. Ведь большинство инвесторов (за исключением отчасти венчурных фондов) предпочитают работать в условиях существенно более низкого уровня рисков, чем в России. Таким образом, система оценки и управления рисками – важный фактор конкурентоспособности предприятий страны на мировом рынке инвестиций.

К одним из приоритетных направлений иностранных инвестиций можно отнести российский топливно-энергетический комплекс. Следовательно, именно здесь необходимо обозначить острую необходимость в создании развитой системы риск-менеджмента и страхования. По этому направлению было проведено достаточно большое количество исследований и анализов и впоследствии предоставлена полная и объемная картина всех возможных рисков и угроз, которые носят техногенный характер. Однако нужно приложить еще дополнительные усилия, чтобы сформировать комплекс по управлению рисками на предприятиях ТЭКа и отработать его механизмы.

На данный момент риск-менеджмент и его культура в Российской Федерации развивается не столь активно. С учетом электроэнергетики все отрасли Российской Федерации в большей степени испытывают необходимость в консультации и работе специалистов по различным вопросам, связанным с риск-менеджментом. Знания этих специалистов должны с определенной периодичностью обновляться и дополняться. К таким же потребностям можно отнести и обязательную процедуру по сертификации услуг, связанных с риск-менеджментом и финансовыми инструментами, которые предлагаются на рынке. Остро возникает потребность по внедрению стандартов по управлению рисками во всех отраслях экономики и в энергетике в частности. Общие запросы всех заинтересованных сторон заключаются и в создании доступной и полной для всех информационной базы данных и знаний по управлению рисками, выполненной на русском языке, поскольку все аналогичные программы уже были созданы и успешно реализуются во многих странах. В качестве примера, свидетельствующего о необходимости внедрения технологий риск-менеджмента в управление компаний, можно выделить аварии на Саяно-Шушенской ГЭС и в Мексиканском заливе.

Использование системы риск-менеджмента в управлении предприятия энергетического сектора обусловлено в основном требованиями рынка международного капитала и желанием изменить в лучшую сторону внутренний контроль и управление рисками в целом. Поскольку отрасль электроэнергетики характеризуется достаточной сложностью, высокой рискованностью и социальной ответственностью, в развитии отрасли на мировом уровне появились важные тенденции, которые могут оказать отрицательное воздействие при неуправляемом течении [4]. Так, для выполнения стратегических целей и обеспечения устойчивого развития отрасли нужно построить грамотное управление рисками. Каждое предприятие в отдельности должно определить уровень приемлемого риска, выбрать методы и инструменты, позволяющие уменьшить потери или полностью их избежать. Для внедрения риск-менеджмента на предприятие необходимо выявить и оценить риски, найти наиболее эффективные методы их управления, что само по себе является сложной научной и практической задачей.

Библиографический список

1. Введение в электроменеджмент. Гос. ун-т Акакия Церетели, ун-т Григола Робакидзе и Грузинского техн. ун-та. Тбилиси, 2011. 184 с.

2. *Елохин, А. Н.* Проблемы риск-менеджмента в энергетике // Проблемы анализа риска. 2010. Т. 7. № 3.

3. *Ратников Л. Д., Ратников Б. Е.* Энергетический бизнес. М.: Дело АНХ, 2008. 416 с.

4. *Павлова О. С.* Риск-менеджмент на российских энергетических предприятиях // Вестник науч.-техн. развития. М. 2011. № 6 (46). С. 34–43.

A. N. Zubkova
Senior Lecturer
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE WORLD EXPERIENCE IN ORGANIZING ELECTRICITY MARKETS

The article deals with the study of the electric industry in General as a natural monopoly. The analysis of foreign experience in organization of electric power companies.

Keywords: *electricity industry, natural monopolies, electric power, competition, privatization, restructuring.*

The electricity industry and the many enterprises make up its structure are natural monopolies as a whole. Natural monopolies, unlike other market structure enterprises, occupy a special place in the system of economic relations. For the natural monopoly in economic theory usually refers to an industry in which the total production costs are less if all products are produced by a single firm than if this one. The same volume of production was divided between two or more firms.

Electric power production is characterized by several features that unlike other natural monopolies (gas supply, water supply) can be determine like the need for a rigid unified system of operational, including automatic, management of the EEC (The European Economic Community) regimes, as well as balanced state regulation in order to prevent unreasonable price pressure on energy consumers and accordingly, to reduce the competitiveness of the country's economy. Such features include: close mode communication of parallel operating power plants and consumer electrical installations, the inability to store electricity, the speed of spreading to a vast territory of transient emergency processes.

In order to limit the negative impact of natural monopolies, restraining reasonable competition, and also to protect the interests of consumers, in most countries with developed industry and electric power industry, regional or national (federal) regulatory commissions have been set up and are coordinating tariffs for electricity, which controlling the relationship between producers and suppliers of electricity, on the one hand, and consumers - on the other.

In the search for ways to improve the efficiency of both the energy sector and the country's economy as a whole, various areas of reforming the electric power industry into a more competitive and efficient industry have been used in world practice, in particular, through:

– privatization (mainly corporatization) of electric power industry enterprises;

– restructuring the structure of the industry;

– liberalization or deregulation (weakening of state regulation).

It should be noted that in some cases the degree of liberalization and the depth of privatization did not have a decisive influence on the level of efficiency and degree of implementation. For example, the crisis in California in the US (United States), as well as the bankruptcy of a number of large distribution companies in Argentina, Chile and some other countries, led to a certain increase in tariffs and a return to the regulation of the electricity market [1].

One of the most effective tools for increasing the efficiency of the energy sector is the creation of electricity markets.

Public ownership of electric power enterprises is usually characteristic of all subsystems of electric power production. State ownership is especially common in the subsystems of generation and transmission of electricity by high-voltage electricity networks, while private investors are most often operating in the electricity distribution sector. At the same time, vertically integrated energy companies are quite common in a number of countries (the United States, Germany, Japan), which ensure the realization of all functions of electric power production, including the distribution and sale of electricity.

Most of the enterprises in the electricity sector are state-owned in France (in the hands of municipalities only 5% of the distribution business are concentrated) and Portugal (in private ownership – about 5% of the generating capacity). The UK (United Kingdom) and Japan's electric power industry is fully privatized (about 15% of generating capacity is concentrated in the ownership of end users) and Belgium (in the ownership of municipalities and end users there are 5% of generating capacity, in municipalities – about 20% of distribution networks).

In the United States, more than 70% of generating capacity is located in private ownership (approximately 30% belong to the government, municipalities and other organizations) and over 75% of distribution networks. The ownership of local authority was widely spread in Austria (100% of networks and 85% of generation), Canada (main networks – 99%, generation and distribution networks – 80% each) and the Netherlands (100% networks and 85% generation). In Norway, the state owns about 30% of the generating capacity and 75% of the main networks, in Sweden 100% of the main networks, half of the generating capacity and distribution networks [1].

The goals of the reforms that are implemented in the electric power sectors of different countries of the world are different. First of all, they are determined by the state of the electricity industry at the time of reform, the economic situation of the country, as well as the amount of investment in electricity.

The demand for energy is constantly growing, keeping secure supplies at the forefront of our global agenda (pic. 1) [2].

Population and GDP (Gross domestic product) growth are the two main factors affecting energy demand. The demand on global energy dramatically increased 48% between 1990 and 2010. It is expected that global primary energy demand will increase at a CAGR (Compound annual growth rate) of 1.64% until 2030, which will keep supply security on the agenda [3].

Growing demand - driven by population and industrial growth - in emerging markets calls for an increase in the supply capacity as well as diversity in the energy generation mix. Diversification of primary energy supplies reduces dependency on a single source and contributes to supply security.

Global energy consumption will continue to increase, with primary energy consumption having reached 12.4 million tons oil equivalent for an increase of 1.8% in 2012.

Therefore, it is always expedient to allocate the goals and priorities which determined by the state during the industrial reform:

1. reduction of electricity tariffs for consumers by increasing the efficiency of the industry (United Kingdom, Argentina, Australia);

2. the need to attract investment to improve the efficiency and development of the industry (Brazil, Argentina);

3. smoothing the difference in electricity prices in different regions of the country (USA, Norway, etc.);

4. preservation of a unified energy system and avoidance of a decrease in the reliability of energy supply;

5. the forms of market transformations in the energy sector differ significantly in different countries, namely: full privatization is carried out only in three countries (Chile, Great Britain and Argentina) and is being prepared for implementation in two countries (Peru and Australia) [1].

Thus, it can be argued that the strengthening of market reforms is a flexible process, which is largely determined by the current state and history of the creation and development of the electric power industry of the country in question. In this question, there is no place for dogmatism and attempts by the countries to copy something from each other. A careful study of the experience of different countries, the choice of the best solutions and the careful application of these solutions in practice are necessary [4].

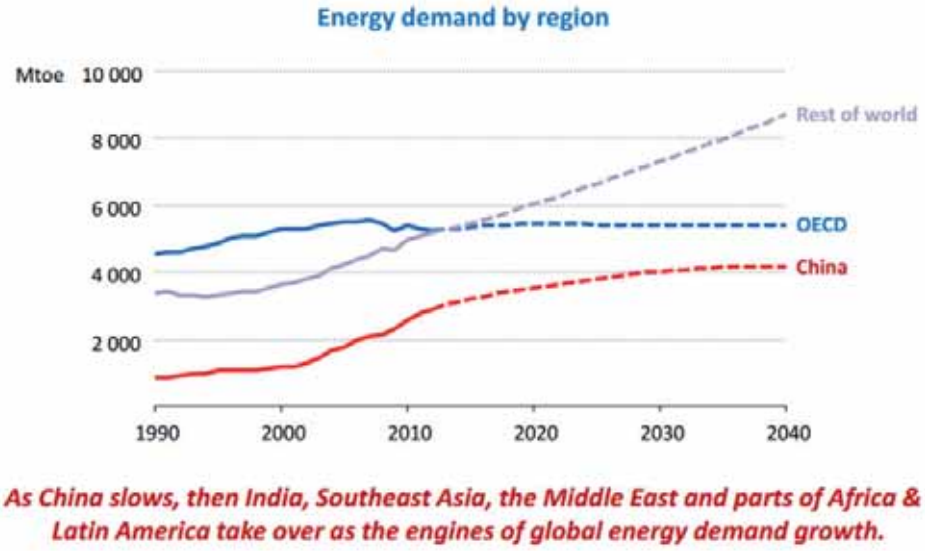
The restructuring of the electric power industry took place in different countries in different ways:

1. Neither disintegration, nor privatization took place in Norway, Sweden and Colombia.

2. In Spain, it was planned to carry out partial transformations and gradually introduce competition without a significant change in the balance between public and private energy companies.

3. In the United States, where the reform process was at an early stage, private energy companies, having free access to the main network, are functionally disintegrated.

4. Great Britain, Chile, Argentina, Peru and the Australian state of Victoria have made profound transformations in the energy sector, including full privatization. At the same time, each country formulated its reasons for the profound changes: Great Britain – relative surplus capacity, Chile, Argentina and Peru, insufficient investment and



Pic. 1. Energy demand by region

low quality of services; Australia – both mentioned above reasons.

5. In Norway, there was excessive capacity and inefficient use of resources. The need for competition in some parts of the country is underlined when deciding on the construction of other types of energy sources in place of very expensive hydropower plants. Norway has the most open electricity market in the world. Norwegians say that their main achievements are lower prices and increased competition in electricity production and energy supply. Any consumer can freely choose an electricity supplier. There were new subjects of the market – brokers and traders. Since 1991, tariffs for electricity consumption have been reduced by 20–30%, and transmission prices by 2-3%. However, the regulatory role of the state was maintained.

6. In Argentina, wholesale prices for electricity are steadily falling, private investments have increased.

One of the most effective tools for increasing the efficiency of the electricity markets and reducing tariffs is to increase competition among relevant market participants. After a debate that lasted for several years, the Council of Ministers of the Electric Power Industry of the countries of the European Commonwealth adopted a decision on liberalization in the West European electricity market. Countries that are part of the energy association NORDEL (Finland, Denmark, Norway and Sweden) create an international open energy market. Australia (Victoria) decided to provide access to the market for end-users with an installed capacity of 10 MW or more [3].

More and more work is being done to strengthen competition in the electricity markets in the United States. The US Federal Energy Commission has adopted two orders, the first of which stimulates the access of participants in the purchase-sale transaction to the electric network of the third partner, and the second obliges the network owner to provide all entities of the energy market with complete information on the state of the network.

Thus, competition becomes the main factor that determines the effectiveness of the relevant actors in the electricity market – energy companies, independent electricity producers, end-users [2].

The following main areas for increasing competition in the electricity sector can be defined:

– competition between electricity suppliers for the consumer (free choice by the consumer of the electricity supplier);

– competition between electricity producers for participation in its supply to the WEM;

– free access of electricity suppliers and buyers to electric grids in which wholesale and retail electricity markets operate.

Competition in the power industry has existed for many years, mainly in fuel supply. The energy company, comparing the supply of suppliers in the fuel market, chooses the most economical solution. Since fuel costs account for more than half of total electricity generation costs, in energy companies that use thermal power plants, reducing fuel costs provides significant savings [6].

Competition between electricity supply companies exists also during the sale of electricity to large municipal consumers, and in relations with independent power plants (industrial plant block-stations). Competition also affects in such industries as construction, operation and ownership of power plants; construction, ownership and operation of power transmission lines and distribution networks; supply of electricity within and outside the relevant energy association; electricity trading with other energy companies and independent suppliers.

Competition between regions of one country depends to a large extent on public policies that define permissible types of power plants and their environmental characteristics, taxes, import and export of electricity, laws on environmental protection. Competition is also affected by local and regional criteria for reliability.

In all countries, large consumers can build their own stations to completely eliminate or reduce the use of purchased electricity. The most effective in these cases is the use of industrial CHP (combined heat and power) plants that operate in parallel with the EEC. The national energy policy usually supports industrial thermal power stations, wind, solar and other power plants that use renewable energy resources [5]. For example, in Finland, industrial power units produce almost a third of all electricity. US legislation, encouraging the creation of industrial CHP plants and small power plants on renewable energy resources, requires energy companies to purchase electricity generated at the CHP plant and at such power plants.

At the same time, the reliability of the EEC and energy associations that provide power to consumers in vast areas is the most important task that requires coordinating the management of the EEC as a single technological object. At the same time, ensuring the reliability of electricity supply is the most important economic task, as emergency power failures of consumers lead to significant economic losses.

Thus, the coordination of the work of the EEC, carried out by the centralized dispatching authorities, provides a significant economic effect at all stages of energy production.

Библиографический список

1. Энергетика: история, настоящее и будущее. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире / Т. А. Бурячок, З. Ю. Буцьо, Г. Б. Варламов и др. К., 2011. С. 384–390.

2. Member of Deloitte Touche Tohmatsu Limited. Deloitte Türkiye. 2013.

3. Electricity Market Integration: Global Trends and Implications for the EAS Region. Wu, Y. (2012). Electricity Market Integration: Global Trends and Implications for the EAS Region in Wu, Y., X. Shi, and F. Kimura (eds.), Energy Market Integration in East Asia: Theories, Electricity Sector and Subsidies, ERIA Research Project Report 2011–2017, Jakarta: ERIA. P. 59–81.

4. EC. Electricity Liberalisation Indicators in Europe, Brussels. October, 2001.

5. Besser, J., J. Farr and S. Tierney // The Political Economy of Long-term Generation Adequacy: Why an ICAP Mechanism is Needed as Part of Standard Market Design, Electricity Journal. August/September, 2002. P. 53–62.

6. CER, 2003. Irish Electricity Market – Proposed Decision, Commission for Energy Regulation, Ireland, 30, April.

УДК 621.313

В. А. Семенова
кандидат экономических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА РОССИИ: ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

В статье исследовано текущее состояние электроэнергетической отрасли России, определены перспективные направления ее развития.

Ключевые слова: *электроэнергетика, монополия, конкуренция.*

V. A. Semenova
PhD, Economic
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ELECTRIC POWER OF RUSSIA: TENDENCIES AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT

The article examines the current state of the electricity industry, defines perspective directions of its development.

Keywords: *power industry, monopoly, competition.*

Электроэнергетика России сегодня – это комплексная отрасль хозяйства, включающая в свой состав и производство электроэнергии, и передачу ее потребителю. Электроэнергетика является стратегической базовой отраслью промышленности России, от уровня развития которой зависит народное хозяйство страны и уровень развития научно-технического прогресса в стране.

В России около 700 основных тепловых электростанций (ТЭС). Они производят до 70% электроэнергии. ТЭС используют органическое топливо – уголь, мазут, сланцы, нефть, газ, торф. Преимущества тепловых электростанций: относительно свободное размещение, связанное с широким распространением топливных ресурсов в России; способность вырабатывать электроэнергию без сезонных колебаний (в отличие от ГЭС). К недостаткам можно отнести: использование невозобновимых топливных ресурсов; низкий КПД; крайне неблагоприятное воздействие на окружающую среду (тепловые электростанции всего мира выбрасывают в атмосферу ежегодно 200–250 млн тонн золы и около 60 млн тонн сернистого ангидрида; также они поглощают огромное количество кислорода).

Тепловая энергетика России располагает уникальной, потенциально эффективной структурой топлива, в которой 63% составляет природный газ, 28% – уголь и 9% – мазут. В ней имеются значительные возможности энергосбережения и охраны окружающей среды.

В то же время эффективность топливоиспользования на ТЭС, работающих на газе, недостаточна. Она значительно уступает топливной экономичности современных парогазовых установок (ПГУ).

Доля АЭС в суммарной выработке электроэнергии в России составляет пока 12%, в США – 20%, Великобритании – 18,9%, Германии – 34%, Бельгии – 65%, Франции – свыше 76%.

Сейчас в России действуют десять АЭС: в Северо-Западном районе – Ленинградская АЭС, в ЦЧР – Курская и Нововоронежская АЭС, в ЦЭР – Смоленская, Калининская АЭС, в Поволжье – Балаковская АЭС, в Северном – Кольская АЭС, на Урале – Белоярская АЭС, на Дальнем Востоке – Билибинская АЭС и самая молодая – Ростовская АЭС.

Достоинства АЭС: можно строить в любом районе; коэффициент использования установленной мощности равен 80%; при нормальных условиях функционирования они меньше наносят вред окружающей среде, чем иные виды электростанций; не поглощают кислород.

Недостатки АЭС: трудности в захоронении радиоактивных отходов (для их вывоза со станции сооружаются контейнеры с мощной защитой и системой охлаждения; захоронение производится в земле на больших глубинах в геологически стабильных пластах); катастрофические последствия аварий на наших АЭС вследствие несовершенной системы защиты; тепловое загрязнение используемых АЭС водоемов. С экономической точки зрения ядерная энергетика специфична. Ей свойственны две кардинальные особенности. Первая особенность связана с боль-

шой ролью капиталовложений, которые вносят основной вклад в стоимость электроэнергии. Поэтому необходимо тщательно и обоснованно учитывать эффективность капиталовложений. Вторая определяется спецификой использования ядерного топлива, которая значительно отличается от той, что присуща обычному химическому топливу.

Гидравлические электростанции (ГЭС). На ГЭС вырабатывается электроэнергия, использующая естественную гидравлическую энергию рек, а также энергию, искусственно аккумулированную в водохранилищах. ГЭС дают около пятой части электроэнергии, производимой в России. Полная мощность ГЭС реализуется в основном в теплые месяцы и в многоводные периоды.

Крупные ГЭС в нашей стране входят в состав Ангаро-Енисейского каскада: Саяно-Шушенская (6,4 млн кВт), Красноярская (6,0 млн кВт), Иркутская (4,0 млн кВт), Братская (4,5 млн кВт), Усть-Илимская (4,3 млн кВт), сооружается Богучанская ГЭС (4 млн кВт). В европейской части страны создан крупнейший Волжско-Камский каскад ГЭС, в состав которого входят Иваньковская, Угличская, Рыбинская, Воткинская, Городецкая, Чебоксарская, две Волжские (возле Самары и Волгограда), Саратовская. Средняя мощность этих ГЭС около 2,4 млн кВт.

ГЭС занимают второе место по количеству вырабатываемой электроэнергии. Гидроэлектростанции являются весьма эффективным источником энергии, поскольку используют возобновимые ресурсы, они просты в управлении (количество персонала на ГЭС в 15–20 раз меньше, чем на ГРЭС) и имеют высокий КПД – более 80%. В результате производимая на ГЭС энергия – самая дешевая.

Исследование стоимости электроэнергии в России в сравнении с ценами в мире показывает ее относительно невысокую стоимость для населения (табл. 1). Но при наших богатствах страны, сулящих потенциально возможно высокие покупательные способности населения, купить на среднемесячную зарплату электроэнергии житель России может относительно немного.

Тарифы на электроэнергию в России устанавливаются региональной властью на основе динамики прогнозируемого изменения цен в стране. Такая политика ценообразования также недостаточно комплексно учитывает параметры эффективности деятельности энергетического комплекса.

Проанализировав тарифы на электроэнергию в Санкт-Петербурге за период с 2008 по 2016 гг., можно отметить, что рост тарифов разнонаправленный, по значению близкий к уровням инфляции в соответствующие годы.

В настоящее время российская электроэнергетика переживает состояние кризиса. Производственные фонды электроэнергетических ком-

Таблица 1

Тарифы на электроэнергию в Санкт-Петербурге за 2008–2016 гг.

Категории потребителей	Одноставочный тариф, руб/кВт*ч, вкл. НДС									Рост цен, %							
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2009/ 2008	2010/ 2009	2011/ 2010	2012/ 2011	2013/ 2012	2014/ 2013	2015/ 2014	2016/ 2015
Население, проживающее в городских населенных пунктах в домах, оборудованных в установленном порядке стационарными газовыми плитами	1,85	2,31	2,55	2,81	2,8	2,97	3,39	3,53	3,84	125	110	110	99	106	114	104	109
Население, проживающее в городских населенных пунктах в домах, оборудованных в установленном порядке стационарными электроплитами и (или) электроотопительными установками (тарифы указаны с учетом НДС)	1,3	1,62	1,75	1,97	1,96	2,08	2,37	2,47	2,69	124	108	113	99	106	114	104	109
Потребители, приравненные к населению (тарифы указаны с учетом НДС)	1,85	2,31	2,55	2,81	2,8	2,97	3,39	3,53	3,84	125	110	110	99	106	114	104	109

паний России сильно изношены, их обновление и ремонт зачастую осуществляются некачественно из-за отсутствия эффективной системы контроля эффективности деятельности в отрасли. Семейственность кадров, «раздутые» штаты и необоснованно высокие доходы топ-менеджеров в государственных монополиях, не сравнимые с кадровой политикой предприятий, работающих в условиях рыночной конкуренции, не позволяют объективно и обоснованно оценивать результаты деятельности государственных энергетических компаний.

Проблемы качества услуг, предоставляемых энергетическими компаниями России, сегодня зачастую ложатся на плечи покупателей электроэнергии: частые отключения, перепады напряжения, приводящие к выходу из строя техники потребителей. А ожидание подключения новых и необходимых мощностей потребителям может в России затягиваться на годы даже на территориях с наличием коммуникаций, вынуждая потенциальных клиентов энергетического комплекса России пользоваться нелегальными схемами получения электроснабжения. Работа в направлении энергосбережения и развития альтернативных источников электроэнергии в России ведется крайне медленно.

Затянувшийся системный кризис экономики страны, вызвавший серьезные перебои в системе денежного обращения и финансировании отрасли, ведет к сокращению инвестиционных программ в электроэнергетике России.

Понимая, что энергетическая отрасль государства является стратегическим объектом, необходимо также учитывать, что рыночная экономика базируется на утверждении, что конкуренция является одним из основных условий эффективности рынка. Это не означает, что необходимо активно внедрить принципы свободной конкуренции в энергетической отрасли в России, нужно стремиться к достижению оптимального баланса контролируемой монополии и конкурентной борьбы в отрасли.

В «Принципах экономики» Маршалл много внимания уделяет вопросам монополии и ее роли в рыночной экономике. Не являясь сторонником монополии, понимая, что монополист, преследующий собственную выгоду, не несет максимального эффекта для благосостояния общества в целом, Маршал пытается найти выгоду монополии. И находит, оправдывая монополию с экономической точки зрения. Она проявляется в том, что сосредоточение производства в руках одного лица или компании позволяет экономить издержки на «Эффекте масштаба». Мелкие и средние предприятия не могут так совершенствовать свои технологии, как монополия, из-за нехватки средств, кроме того, монополии уверены, что все эффекты от вложений в нововведения будут их. Мелким конкурирующим компаниям «приходится бороться друг с другом, чтобы привлечь к себе внимание потребителей, и они все в совокупности затрачивают значительно больше, чем единственная фирма, на рекламу во всех ее формах; они оказываются не в состоянии добиться многих видов экономии, которая является следствием производства в крупном масштабе» [1]. Но Маршал оговаривается, что эффект от масштаба возникает при грамотном управлении монополией и наличии необходимого капитала.

Таким образом, текущее кризисное состояние экономики страны обнажило актуальность проблем в сфере электроэнергетики в России, требуя создания системы эффективного, возможно, общественного контроля за деятельностью государственных монополий, внедрения разумной конкуренции в отрасли, сохраняющей при этом ее стратегическую значимость для государства и населения.

Библиографический список

1. *А. Маршалл*. Принципы экономической науки. М.: Прогресс, 1993. Т. 1. 594 с.

2. [Электронный ресурс]. URL: http://minenergo.gov.ru.

3. [Электронный ресурс]. URL: https://pes.spb.ru/files/download_files/tarify_2016.pdf.

4. [Электронный ресурс]. URL: http://riarating.ru/infografika/20160701/630029979.html.

УДК 621.3.072

В. С. Акопов[1]
кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Е. В. Евсеев[2]
заведующий учебно-лабораторным комплексом

Т. Г. Полякова[3]
кандидат технических наук
[1,2,3]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС «СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЛС»

Приведено краткое описание учебно-исследовательского комплекса «Система управления РЛС», предназначенного для реализации практико-ориентированной подготовки студентов и их компетентного подхода. Комплекс создан на современной элементной базе, построен по блочно-модульному принципу и содержит элементы, имеющие как традиционное, так и оригинальное исполнение.

Ключевые слова: *учебный комплекс, исследовательский стенд, система автоматического управления, профессиональные компетенции.*

V. S. Akopov[1]
PhD, Tech., Senior Researcher

E. V. Evseev[2]
The Head of Edicational Laboratory Complex

T. G. Polyakova[3]
PhD, Tech.
[1,2,3]*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

EDUCATIONAL RESEARCH LABORATORY COMPLEX "RADAR CONTROL SYSTEM"

The article describes the educational and research complex "Radar Control System", designed to implement practical-oriented training of students and their competent approach. The complex is created on a modern element base, built on a block-modular principle and contains elements that have both traditional and original design.

Keywords: *educational complex, the research stand, automatic control system, professional competence.*

В федеральном государственном образовательном стандарте по группе направлений подготовки и специальностей «Автоматика и управление» отмечается, что область профессиональной деятельности применительно к направлению «Управление в технических системах» включает, в частности, проектирование, исследование, производство систем и средств управления в промышленной и оборонной отраслях; создание современных программных и аппаратных средств исследования и проектирования, контроля, технического диагностирования и промышленных испытаний систем автоматического и автоматизированного управления [1].

Объектами профессиональной деятельности подготавливаемых специалистов являются системы управления, контроля, технического диагностирования, методы и средства их проектирования, моделирования, экспериментального исследования.

Для реализации практико-ориентированной подготовки специалистов необходимо специальное лабораторное оборудование, позволяющее не только решать узкие конкретные задачи анали-

за, но и формировать данные для многоэтапного проектирования, развивая творческий потенциал студентов в процессе обучения.

Промышленностью выпускается учебная техника, предназначенная для исследования различных систем управления [2–4]. Все они, безусловно, имеют свою научную, техническую или аппаратную специфику, которая зачастую ограничивает их использование только в рамках общепрофессиональных дисциплин.

В отличие от стандартного учебно-лабораторного оборудования, предлагаемого на рынке, данный учебно-исследовательский комплекс дает возможность в полном объеме реализовывать компетенции, установленные ФГОС, такие как:

– способность демонстрировать навыки работы в коллективе;

– способность выполнять эксперименты на действующих объектах по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением информационных технологий и технических средств;

– готовность участвовать в работах по изготовлению, отладке и сдаче в эксплуатацию систем и средств управления;

– готовность участвовать в разработке и изготовлении стендов для комплексной отладки и испытаниях программно-аппаратных управляющих комплексов;

– способность участвовать в монтаже, наладке, настройке, проверке и сдаче опытных образцов программно-аппаратных средств и комплексов автоматизации и управления и т. д.

Разработанный учебно-исследовательский комплекс (рис. 1) выполнен на современной элементной базе и предназначен для реализации практико-ориентированной подготовки специалистов в области «Управления в технических системах». Данный комплекс может быть использован не только для анализа качества управления в следящих САР, но и для изучения характеристик блоков и элементов, составляющих привод.

Стенд обеспечивает выполнение следующего комплекса исследований:

– анализ динамики исходной непрерывной системы управления РЛС;

– анализ точности исходной системы;

– идентификация элементов системы управления РЛС, обладающих переменными (задаваемыми) параметрами;

– синтез закона управления для непрерывной системы управления РЛС;

– исследование скорректированной непрерывной системы управления РЛС с новым управляющим устройством;

– измерение, автоматическая обработка и регистрация информации в процессе выполнения исследований.

Следящая система предназначена для дистанционного вращения РЛС вокруг оси азимута. Структурная схема рассматриваемой системы представлена на рис. 2.

Упрощенная принципиальная электрическая схема рассматриваемой системы выглядит следующим образом (рис. 3).

На этом рисунке представлен вариант схемы, собираемой из отдельных разомкнутых блоков путем установки перемычек между соответствующими элементами с корректирующим звеном в цепи обратной связи по скорости.

Входным задающим воздействием является угол поворота ротора сельсина-датчика (СД). На оси объекта управления жестко закреплен ротор сельсина-приемника (СП). Сельсины работают в трансформаторном режиме. Сигнал переменного тока (частота 400 Гц), пропорциональный их угловому рассогласованию, поступает на один из входов фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ) [5]. На второй вход ФЧВ подается переменное напряжение частотой 400 Гц с амплитудой, несколько превышающей максимально

Рис. 1. Общий вид учебно-исследовательского стенда

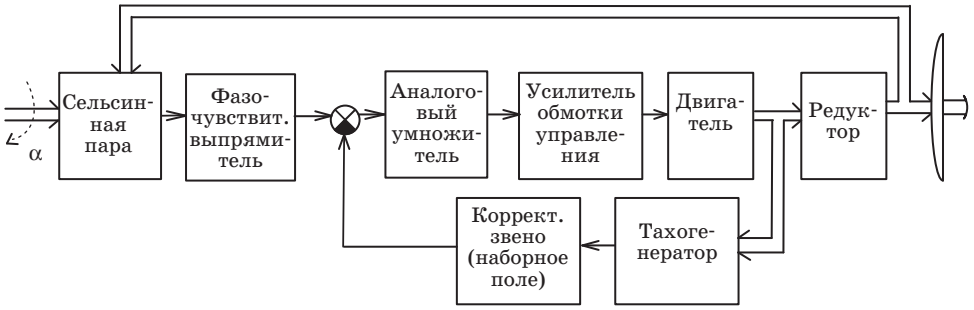


Рис. 2. Структурная схема стенда

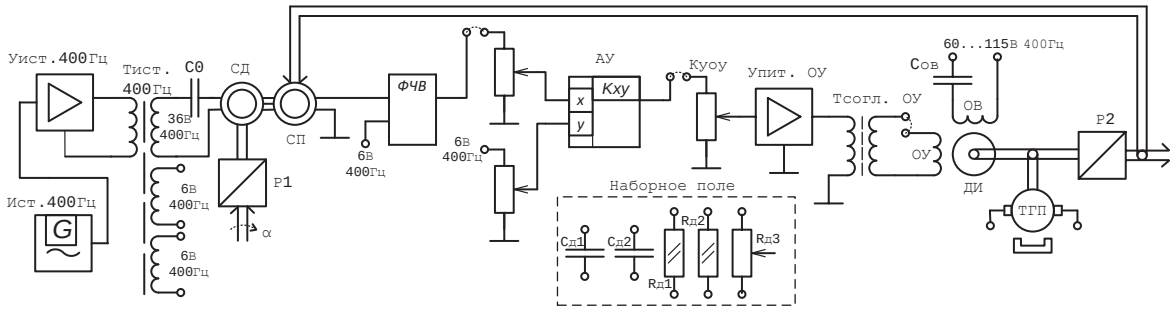


Рис. 3. Упрощенная принципиальная электрическая схема следящего привода угла поворота антенны РЛС

возможное значение сигнала рассогласования при максимальном рассогласовании в системе по углу управления. На выходе ФЧВ образуется напряжение, величина которого пропорциональна амплитуде напряжения переменного тока на выходе СП. Полярность напряжения на выходе ФЧВ определяется разностью фаз напряжений переменного тока на входах ФЧВ. Напряжение с выхода ФЧВ подается на один из входов четырехквадрантного аналогового умножителя (АУ), применяемого в качестве усилителя с электронным управлением, и определяет амплитуду и фазу выходного сигнала, снимаемого с АУ. На второй вход аналогового умножителя подается переменное (опорное) синусоидальное напряжение с рабочей частотой (400 Гц) двигателя привода. Выход АУ через регулятор коэффициента усиления подключен ко входу электронного усилителя обмотки управления (УОУ), где сигнал усиливается по напряжению и мощности до рабочих значений приводного двигателя. На выход УОУ в данном стенде подключена обмотка управления двухфазного асинхронного двигателя, который через редуктор поворачивает объект регулирования (антенну) и связанный с ним ротор СП до тех пор, пока сигнал рассогласования между заданным направлением и углом поворота объекта регулирования не станет равным нулю.

Для обеспечения возможности стабилизации системы и придания ей заданных динамических качеств предусмотрено введение местных обратных связей. Для этого вал двигателя жестко соединен с валом тахогенератора постоянного тока, сигнал с которого, в свою очередь, может быть подан на собранное на наборном поле корректирующее *RC*-звено.

Переменный коэффициент усиления блока аналогового усилителя является элементом, с помощью которого реализуется последовательная коррекция в рассматриваемой замкнутой системе управления углом поворота.

Элементы учебно-исследовательского комплекса имеют как традиционное исполнение, так и оригинальное.

В учебно-исследовательском комплексе разработан автономный источник напряжения частоты 400 Гц, обладающий высоким качеством генерируемой синусоиды. Разработанный генератор построен с использованием больших интегральных микросхем [6].

Учебно-исследовательский комплекс содержит современную регистрирующую и измерительную аппаратуру. Модуль осциллографа объединяет в себе цифровой осциллограф АКИП-4122/1V и гнезда расширения VGA, LAN и USB host. Блок позволяет производить все виды измерений в рамках лабораторных работ, подключить дополнительный монитор для демонстрации к гнезду VGA осциллографа, соединить осциллограф с компьютером для регистрации сигналов с помощью программного обеспечения DS Wave Oscilloscope, подключить флеш-накопитель для сохранения в цифровом виде результатов измерений и их последующей обработки, в частно-

сти при выполнении процедуры идентификации устройств стенда.

Измерительная техника включает в себя высокоточную технику: мультиметр и LCR-метр модели **DT-9931,** необходимый для измерения активных, индуктивных и емкостных свойств изучаемых устройств; блок стрелочного мультиметра (мультиметр-измеритель MASTECH 7030), который может быть использован при наблюдении медленно меняющихся процессов.

Комплекс построен по блочно-модульному принципу, что дает возможность снимать все статические и динамические характеристики элементов и устройств, входящих в систему автоматического управления. Обработка экспериментальных данных позволяет проводить верификацию математических моделей, разрабатываемых для решения задачи синтеза регулятора. Используются методы минимаксной идентификации и метод площадей Симою [7].

В ходе выполнения технического задания на проектирование студенты не только осуществляют расчет регулятора системы управления антенной [8, 9], они выполняют имитационное моделирование скорректированной системы [10], разрабатывают его электрическую принципиальную схему и, в случае необходимости, печатную плату с использованием активных элементов [11], проводят монтаж регулятора и испытывают его в составе учебно-исследовательского комплекса.

К основным техническим особенностям учебного стенда можно отнести следующие:

– стенд содержит реальную самолетную антенну и ее исполнительный механизм;

– несколько устройств учебного лабораторного стенда содержат переменные (изначально настраиваемые) параметры, что значительно увеличивает число вариантов (до 24) исходных состояний лабораторного стенда;

– стенд содержит классические элементы системы автоматического управления, построенные на современной электронной базе;

– исследования на стенде позволяют студентам получить навыки, необходимые для выполнения полного цикла анализа и синтеза системы автоматического управления, включая моделирование, идентификацию, синтез закона управления, макетирование регулятора, испытание созданной системы [12].

Учебно-исследовательский комплекс был представлен на Петербургской технической ярмарке – 2017 и награжден дипломом в номинации «Информационные технологии, технологии управления, образовательные технологии, повышение статуса и стандартов профессиональной подготовки World Skills Hi-Tech, Future Skills, формирование ключевых компетенций персонала, лучший результат интеллектуальной деятельности, патент, полезная модель, программа ЭВМ, публикация, диссертация».

Библиографический список

1. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования. М.: М-во образования Рос. Федерации, 2000.

2. Учебное оборудование и техника. Челябинск: Учтех-Профи. [Электронный ресурс]. URL: http//www.labstan.ru.

3. [Электронный ресурс]. URL: http//www.techlabindastru.ru.

4. [Электронный ресурс]. URL: http//www.newstyle-v.ru.

5. [Электронный ресурс]. URL: http//www.pashinin.com.

6. [Электронный ресурс]. URL: http//www.elektrik.slovarik.org.

7. *Сазонов Г. Г.* Идентификация и диагностика систем: учеб. пособие для студентов. М.: МГОУ, 2005. 38 с.

8. *Акопов В. С., Бураков М. В., Полякова Т. Г.* Проектирование авиационного следящего электропривода малой мощности: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2007. 172 с.

9. *Полякова Т. Г., Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В.* Проектирование электромеханических систем автоматического управления малой мощности: учеб. пособие; под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2013. 197 с.

10. *Акопов В. С.* Моделирование систем в MATLAB: лаборат. практикум. СПб., 2012. 64 с.

11. *Акопов В. С., Евсеев Е. В., Мартынов А. А.* Электропривод с микропроцессорными системами управления: учеб. пособие; под ред. проф. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2016. 123 с.

12. Мехатроника, автоматика и робототехника: матер. междун. науч.-практ. конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. № 1. С. 125–129.

УДК 378

М. М. Буркина
кандидат экономических наук, доцент
ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК)

К ВОПРОСУ О ПОДГОТОВКЕ КАДРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА»

В статья рассматриваются тенденции высшего образования, изменения в области деятельности выпускников, освоивших программу бакалавриата 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Ключевые слова: *федеральный государственный образовательный стандарт, мехатроника и робототехника, подготовка кадров, высшее образование, квалификация, бакалавриат.*

M. M. Burkina
PhD, Economic, Associate Professor
The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC)

THE QUESTION OF THE TRAINING OF ENGINEERS

The article discusses the trends in higher education, changes in the area of activity of the graduates who have completed the undergraduate program 15.03.06 mechatronics and robotics.

Keywords: *federal state educational standard, mechatronics and robotics, training, higher education, qualified, baccalaureate.*

На современном этапе развития российского общества, характеризующегося глобальными социально-экономическими преобразованиями, интеграция образования, науки и производства выступает приоритетным направлением при подготовке инженерных кадров.

Необходимо отметить, что противоречиво оцениваемые десятилетия реформ в российском высшем образовании (переход на двухуровневую, а теперь и трехуровневую систему подготовки кадров; внедрение механизмов и стимулов академической мобильности; реализация компетентностной модели образовательного процесса и др.) тем не менее способствовали качественным изменениям на системном уровне, интенсификации инновационных процессов, внедрению новых технологий обучения, росту конкуренции по качеству образовательных услуг, приближению высшей школы к требованиям и запросам работодателей [1].

В Российской Федерации установлены следующие уровни высшего профессионального образования:

– высшее образование – бакалавриат;

– высшее образование – специалитет, магистратура;

– высшее образование – подготовка кадров высшей квалификации [2].

При этом предполагается преемственность всех уровней профессионального образования и непрерывность образовательного маршрута: «Система образования создает условия для непрерывного образования посредством реализации основных образовательных программ и различных дополнительных образовательных программ, предоставления возможности одновременного освоения нескольких образовательных программ, а также учета имеющихся образования, квалификации, опыта практической деятельности при получении образования» [2].

Федеральные государственные образовательные стандарты трех уровней высшего образования имеют рамочный характер, также устанавливают требования к кадровому составу, информационной образовательной среде, материально-техническому, финансовому обеспечению, электронно-библиотечной системе, вместе с тем предоставляют значительную свободу разработчикам конкретной образовательной программы в определении ее содержательного наполнения, формы реализации, применяемых технологий, выбора мест и содержания практики, тематики выполняемых научно-исследовательских работ.

Большое значение, наряду с учетом требований ФГОС всех уровней высшего образования,

имеет процесс освоения образовательной программы. Значение таких концептуальных основ состоит в том, чтобы зафиксировать общие подходы в части содержания (особенно его фундаментального ядра), ожидаемых результатов освоения образовательной программы, способов их фиксации, диагностики и оценки, применяемых форм, средств, методов и технологий обучения и сопровождения самостоятельной работы обучающихся. Концепция, таким образом, должна отражать общее видение, общие подходы к проектируемой образовательной программе в контексте непрерывного профессионального образования, учитывать факторы развития соответствующей отрасли научного знания и достижения образовательной практики.

В этой связи важно представлять себе, на каком уровне формируются какие компетенции, какие компетенции носят сквозной характер. Очевидно, что набор компетенций и уровень овладения ими зависит не только от предметной области (сферы высшего образования), но и от образовательного уровня (степени). Один из идеологов Болонских реформ в высшем образовании Байденко В. И. справедливо отмечает, что составы компетенций для разных ступеней могут быть различными. Магистр должен обладать всеми компетенциями бакалавра и добавочными компетенциями, такими как:

– системное понимание области обучения и владение навыками и методами исследований, связанных с этой областью;

– способность планировать и проводить исследования, а также применять их результаты в соответствии с критериями научной достоверности;

– способность к критическому анализу, синтезу и оценке новых и сложных идей [3].

Обратимся к государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования РФ по направлению подготовки дипломированного специалиста 652000 «Мехатроника и робототехника», в котором дано определение робототехники: «Робототехника – область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, предназначенных для автоматизации сложных технологических процессов и операций, в том числе выполняемых в недетерминированных условиях, для замены человека при выполнении тяжелых, утомительных и опасных работ» [4].

Там же определены объекты профессиональной деятельности, которыми «являются технические системы, агрегаты, машины и комплексы машин различного назначения, построенные на базе мехатронных модулей, используемых в качестве информационно-сенсорных, исполнительных и управляющих устройств. В том числе роботы и робототехнические системы как промышленного, так и непромышленного назначения, а также необходимое программно-алгоритмическое обеспечение для управления такими системами, их проектирования и эксплуатации».

В соответствии с Указом Президента РФ от 16 декабря 2015 г. № 623 «О Национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники», а также Распоряжением Правительства Российской Федерации «Об утверждении перечня специальностей и направлений подготовки высшего образования, соответствующих приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики от 6 января 2015 г. № 7-р (с изменениями на 16 апреля 2016 г.)» «Мехатроника и робототехника» признана приоритетным направлением инженерной подготовки, в первую очередь в интересах обороноспособности государства.

В 2015 г. Приказом Минобрнауки России от 12.03.2015 № 206 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» (уровень бакалавриата)» введен новый федеральный образовательный стандарт, в котором прописаны требования к освоению программы бакалавриата. В результате освоения программы бакалавриата у выпускника должны быть сформированы общекультурные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции.

«Область профессиональной деятельности выпускников, освоивших программу бакалавриата, включает проектирование, исследование, производство и эксплуатацию мехатронных и робототехнических систем для применения в автоматизированном производстве, в оборонной отрасли, Министерстве внутренних дел Российской Федерации, Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, на транспорте, в сельском хозяйстве, в медицине и в других областях».

В объекте деятельности выпускников прослеживается уход от понятия «технических систем», конкретизируются «мехатронные и робототехнические системы» и подробно перечисляются их составляющие.

Объектами профессиональной деятельности выпускников, освоивших программу бакалавриата, являются мехатронные и робототехнические системы, включающие информационно-сенсорные, исполнительные и управляющие модули, их математическое, алгоритмическое и программное обеспечение, методы и средства их проектирования, моделирования, экспериментального исследования, отладки и эксплуатации, научные исследования и производственные испытания мехатронных и робототехнических систем, имеющих различные области применения.

Подготовка инженерных кадров, как и подготовка преподавательских кадров, является не-

прерывным процессом. На каждом из этапов непрерывной подготовки решаются свои специфические задачи, реализуются свои специфические технологии.

В современных условиях глобализации, экологических вызовов, переформатирования мирового порядка, геополитического противостояния изменяются роль, миссия, функции высшего образования. Это обстоятельство не могло не быть отражено в стратегических документах международного уровня. В частности, во Всемирной декларации о высшем образовании подчеркивается, что высшее образование существует, чтобы служить общественным интересам, и не является «продуктом для продажи».

Миссия высшего образования – вносить свой вклад в устойчивое развитие и совершенствование общества в целом посредством: подготовки высококвалифицированных выпускников, способных удовлетворить потребности всех отраслей человеческой деятельности; создания, накопления и распространения знаний путем исследований; раскрытия, сохранения и поддержки культурного плюрализма и многообразия; расширения возможностей для получения высшего образования в течение всей жизни; развития и улучшения образования на всех уровнях; защиты и развития гражданского общества путем подготовки молодых людей в духе ценностей, составляющих основу прав и обязанностей гражданина в демократическом обществе, и путем выработки критического и независимого мнения в дискуссии о стратегических выборах, перед которыми встает общество [5].

Во все времена подготовка инженерных кадров, вне зависимости от политического строя той или иной страны, технологических инноваций, является ключевым условием поддержания на необходимом уровне и воспроизводства высококвалифицированных кадров, интеллектуальных ресурсов для обеспечения потенциала развития любого государства.

В условиях развития инновационной экономики объединение усилий организаций высшего образования, научно-исследовательских организаций, работодателей и рынка труда ведет к формированию сотрудничества для объединения всех видов ресурсов при подготовке инженерных высококвалифицированных кадров.

Библиографический список

1. *Гвильдис Т. Ю.* Подходы к разработке универсально-ориентированной образовательной программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре // Ученые записки ун-та им. П. Ф. Лесгафта. 2015. № 1 (119). С. 66–70.

2. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации». М.: Омега-Л., 2014. 134 с.

3. *Байденко В. И.* Выявление состава компетенций выпускников вузов как необходимый этап проектирования ГОС ВПО нового поколения: метод. пос. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2006. 72 с.

4. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования. Направление подготовки дипломированного специалиста 652000 «Мехатроника и робототехника». М., 2000.

5. Всемирная декларация о высшем образовании для XXI века: подходы и практические меры. ЮНЕСКО, 1998.

УДК 378.147

И. В. Елтышева
старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Б. К. Елтышев
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

РЕАЛИЗАЦИЯ СОДЕРЖАТЕЛЬНОЙ ПРЕЕМСТВЕННОСТИ В СИСТЕМЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

В статье рассмотрены подходы к выстраиванию системы непрерывного образования, обеспечения его содержательной преемственности на разных уровнях. Проблема рассмотрена на примере изучения дисциплины компьютерного моделирования.

Ключевые слова: *непрерывное образование, содержательная преемственность, компьютерное моделирование.*

I. V. Eltyisheva
Senior Lecturer
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

B. K. Eltyishev
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State Marine Technical of University

THE IMPLEMENTATION OF A MEANINGFUL CONTINUITY IN THE SYSTEM OF CONTINUOUS EDUCATION PROGRAM

The article describes the approaches to building a system of continuous education, making it meaningful continuity at different levels. The problem is considered on the example of the discipline of computer simulation.

Keywords: *continuous education, substantial continuity, computer simulation.*

Последнее десятилетие образование в России решает весьма непростые задачи. С одной стороны, необходимо сохранить сильные стороны советского образования, позволившего нашей стране стать одной из высокоразвитых в научном и культурном отношении стран мира. С другой стороны, российское образование необходимо сделать адаптивным и гибким, чтобы в новых условиях оно отвечало не только изменяющимся запросам экономики и рынка труда, но и потребностям личности. На первое место выходит мотивация индивида к расширению своего образования, что успешно можно реализовать в условиях непрерывного образования. Программа развития российского образования предполагает, что тезис «образование на всю жизнь» на сегодняшний день должен быть заменен тезисом «образование всю жизнь». Для реализации такой концепции требуется выстраивание системы непрерывного образования.

Такой подход требует модернизации методологических, организационных и психолого-педагогических основ проектирования современного образовательного процесса.

Требуется динамичный подход к знаниям, способность к ассимиляции новых достижений в науке, совершенствование умений учиться, стимулирование мотивации к учебе, а также реализация творческого инновационного подхода.

Процесс непрерывности образования может быть реализован по вертикальной траектории. Основным принципом непрерывного образования является его преемственность. Можно выделить структурную, содержательную и процессуальную преемственность.

Содержательная преемственность обеспечивается посредством согласования содержания образования на уровнях среднего и высшего образования.

Поскольку содержание образовательного процесса определяют компетенции образовательных стандартов, рассмотрим, как возможно обеспечить содержательную преемственность для компетенций:

– «способность владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, готовность использовать компьютер как средство работы с информацией» (ОК-11);

– «способность использовать базовые знания и законы в области естественно-научных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования» (ПК-2).

Предлагается рассмотреть процесс моделирования транспортной задачи.

На первом этапе для среднего профессионального образования это возможно сделать в курсе «Компьютерное моделирование», используя пакет прикладных программ Excel.

Сформулируем задачу. Автомобильная компания имеет три завода в Тихвине, Кингисеппе и Киришах и два распределительных центра в Санкт-Петербурге и Москве. Объемы производства заводов компании в следующем квартале составят соответственно 1000, 1500 и 1200 автомобилей. Ежеквартальная потребность распределительных центров составляет 1400 и 2300 автомобилей соответственно. Известны расстояния между заводами и распределительными центрами, приведенные в табл. 1, и стоимость перевозки одного автомобиля на один километр.

Требуется определить транспортные потоки для обеспечения требований потребителей при минимальной стоимости перевозок.

Услуги транспортной компании за перевозку одного автомобиля по каждому из маршрутов приведены в табл. 2

Построим математическую модель. Сформулируем задачу линейного программирования в общем виде [1]:

x_{ij} – груз, перевезенный от производителя i к потребителю j;

c_{ij} – стоимость транспортировки от производителя i к потребителю j;

Таблица 1

	Санкт-Петербург	Москва
Тихвин	1000	2690
Кингисепп	1250	1350
Кириши	1275	850

Таблица 2

	Санкт-Петербург	Москва
Тихвин	80 80	215
Кингисепп	100	108
Кириши	102	68

a_i – объем грузов в пункте отправления;

b_j – объем грузов в пункте назначения.

Минимизировать общую стоимость перевозки

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} x_{ij} \cdot c_{ij} \qquad i = 1 \cdot \cdot n \qquad j = 1 \cdot \cdot m$$

при условии $\sum_{i=1}^{n} a_i = \sum_{j=1}^{m} b_j$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad i = 1 \cdot \cdot n \qquad j = 1 \cdot \cdot m.$$

Для представленной выше задачи математическая модель имеет вид

$$z = 80 \cdot x_{11} + 215 \cdot x_{12} + 100 \cdot x_{21} + 108 \cdot x_{22} + \\ + 102 \cdot x31 + 68 \cdot x_{32}$$

(целевая функция).

При ограничениях по производителям:

$$x_{11} + x_{12} = 1000 \ (Тихвин);$$

$$x_{21} + x_{22} = 1500 \ (Кингисепп);$$

$$x_{31} + x_{32} = 1200 \ (Кириши);$$

по продавцам:

$$80 \cdot x_{11} + 100 \cdot x_{21} + 102 \cdot x_{31} = 1400$$

(*Санкт-Петербург*);

$$215 \cdot x_{12} + 108 \cdot x_{22} + 68 \cdot x_{32} = 2300 \ (Москва)$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad i = 1,2,3 \qquad j = 1,2.$$

Эти ограничения выражены в виде равенств, поскольку общий объем произведенных автомобилей (1000 + 1500 + 1200 = 3700) равен суммарному спросу распределительных центров (2300 + 1400 = 3700), следовательно, задача сбалансирована.

Специфическая структура ограничений позволяет решить эту задачу с помощью так называемой транспортной таблицы. Когда суммарный объем предложений не равен общему объему спроса на товары, транспортная модель называется несбалансированной. Чтобы несбалансированную транспортную задачу сделать сбалансированной, будем вводить фиктивные пункты назначения или отправления.

Решение в среде Excel представлено на рис. 1. Рабочий лист табличного процессора Excel состоит из разделов входных и выходных данных. В разделе входных данных *обязательно* должны содержаться следующие данные: количество пунктов отправлений (ячейка B3), количество пунктов назначений (ячейка B4), транспортная таблица, т. е. матрица стоимостей (диапазон B6:K15), названия пунктов отправления (диапазон A6:A15), названия пунктов назначения (диапазон B5:K5), объемы предложения (диапазон L6:L15) и объем спроса (диапазон B16:K16).

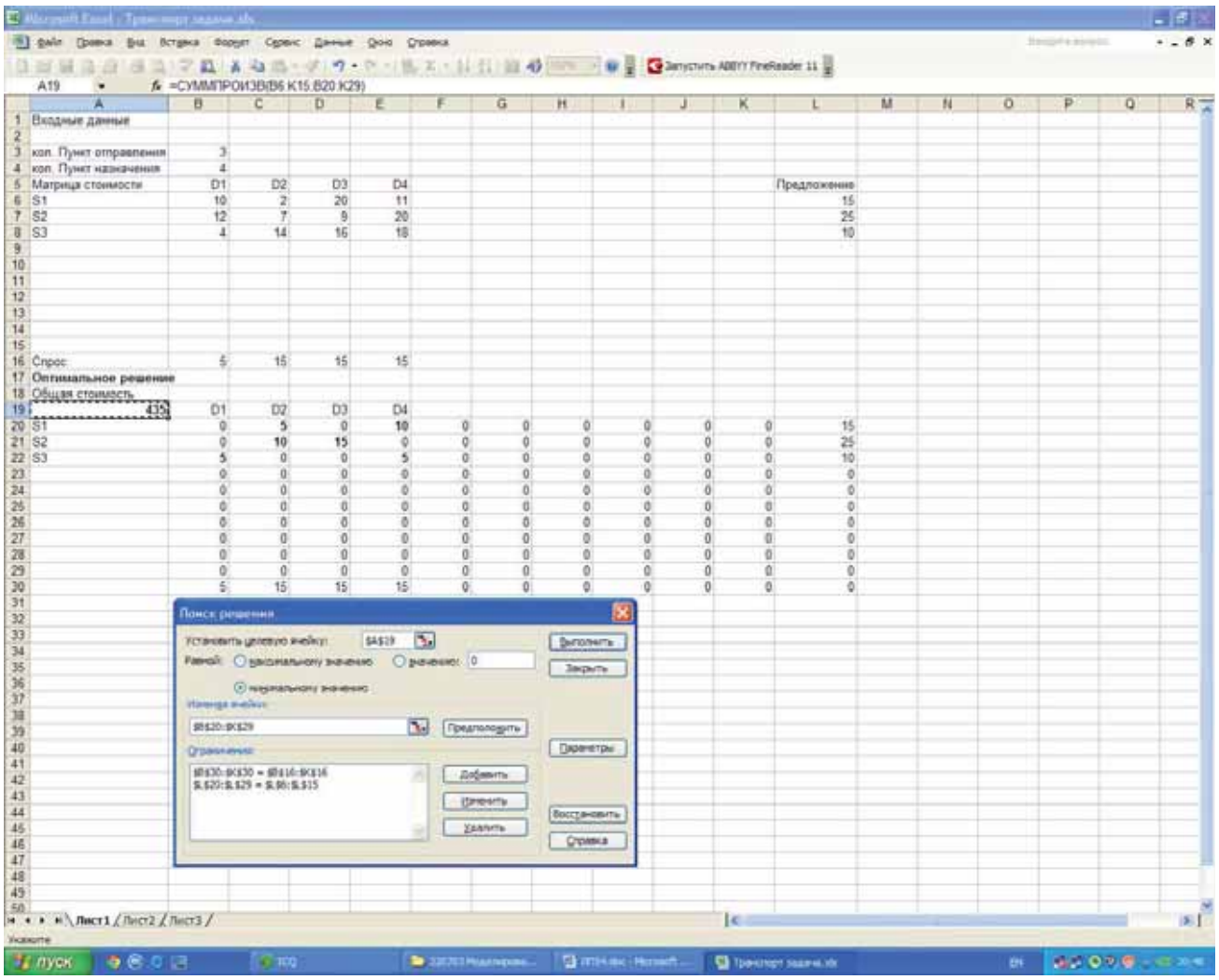


Рис. 1. Решение транспортной задачи в среде Excel

В разделе выходных данных (диапазон B20:K29) содержится оптимальное решение в матричном виде, которое вычисляется автоматически. Соответствующее значение общей стоимости вычислено в ячейке A19.

В период обучения в ВУЗе на первом курсе, изучая пакет прикладных программ MathCad, эффективно снова вернуться к решению транспортной задачи, поскольку постановка задачи и ее математическая модель уже известна [2]. Математическая модель задачи в среде MathCad представлена на рис. 2.

На старших курсах при изучении дисциплины «Системы массового обслуживания» студенты снова возвращаются к решению транспортной задачи на новом уровне, используя моделирующую систему общего назначения GPSSW [3].

Задание на курсовое проектирование.

Транспортный цех фирмы обслуживает перевозки грузов между терминалами разных компаний, расположенных в разных районах города (рис. 3, флажки 1–5). В упрощенной постановке, принятой в данном задании, время переезда грузовика от одной точки до другой определяется расстоянием по прямой между ними и средней скоростью транспортного потока в городе, равной 25 км/ч. Закон распределения времени переезда – экспоненциальный.

Для измерения грузопотоков в задании принят условный грузовик, вмещающий 1000 единиц условного груза. Транзитные грузы на терминалах формируются партиями, их размер (в единицах условных грузов) и время формирования приведены в табл. 3. После разгрузки и погрузки в грузовик имеющегося в данный момент транзитного груза в любом пункте маршрута он отправляется

Таблица 3

Номер терминала	Размер партии грузов, в условных единицах	Время формирования партии, мин
1	65±35	470±230
2	24±11	270±100
3	51±17	320±180
4	33±13	410±150
5	53±20	480±190

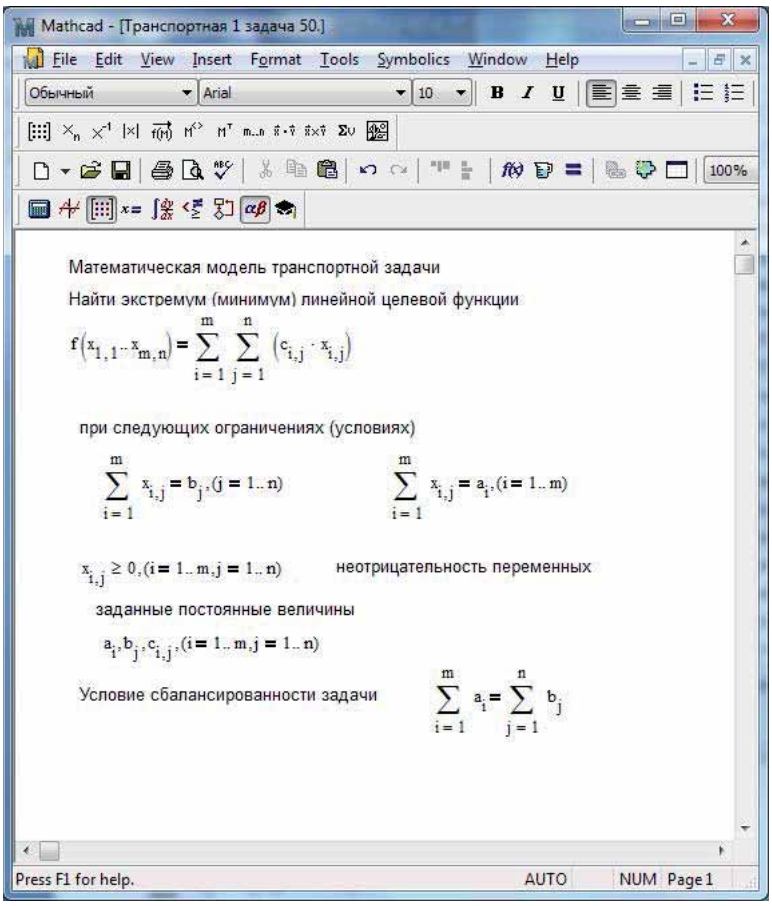
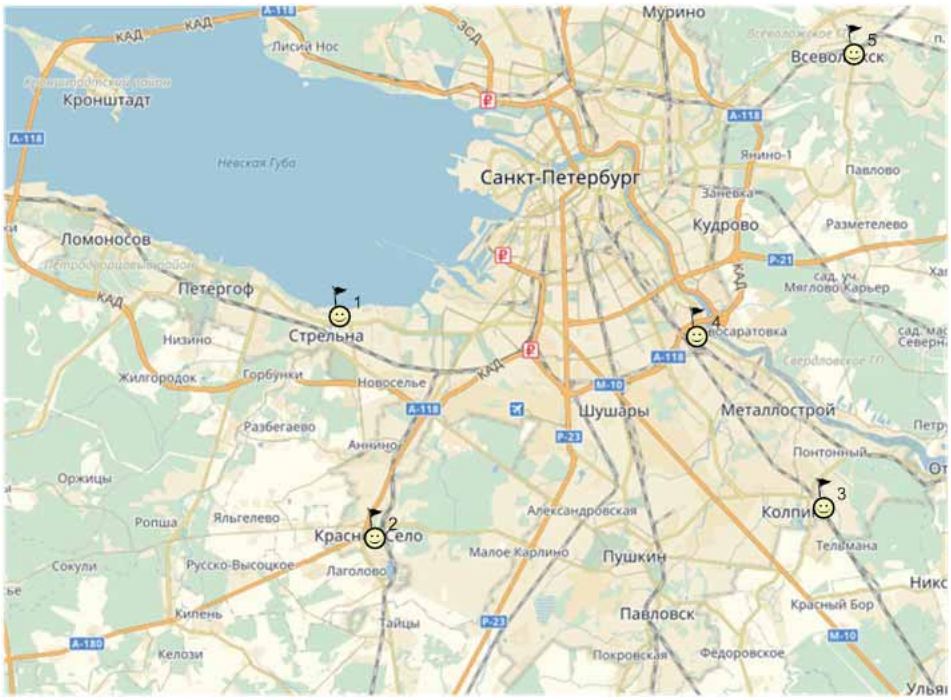


Рис. 2. Математическая модель задачи в среде MathCad



Масштаб 5 км

Рис. 3. Схема расположения терминалов

далее по маршруту, указанному в индивидуальном задании. В каждом терминале разгружается в среднем $1/N - 1$ часть груза (N – число терминалов в маршруте) и догружается имеющимся в терминале на этот момент транзитным грузом, после чего грузовик отправляется дальше, и этот процесс циклически повторяется. Время погрузки-выгрузки 1±0,5 мин на единицу условного груза.

В начальный момент все грузовики расположены в пункте начального размещения или примерно равномерно размещены по всем терминалам маршрута, как указано в табл. 4.

Смоделировать работу транспортного цеха фирмы в течение 2000 ч.

Таблица 4

Вариант	Количество грузовиков	Маршрут	Начальное размещение	Фамилия студента	Дата выдачи
1	6	34512	3		
2	5	23451	2		
3	6	34215	3		
4	7	41235	4		
5	8	54123	5		
6	9	15432	равномерное		
7	4	14325	1		
8	5	21543	2		
9	6	32145	3		
10	7	43215	4		

Оценить и описать работу транспортной системы, в частности среднюю загрузку грузовиков, частоту пустых перегонов, время выхода системы в установившийся режим. Предложить пути улучшения работы.

Указания к выполнению курсового проекта.

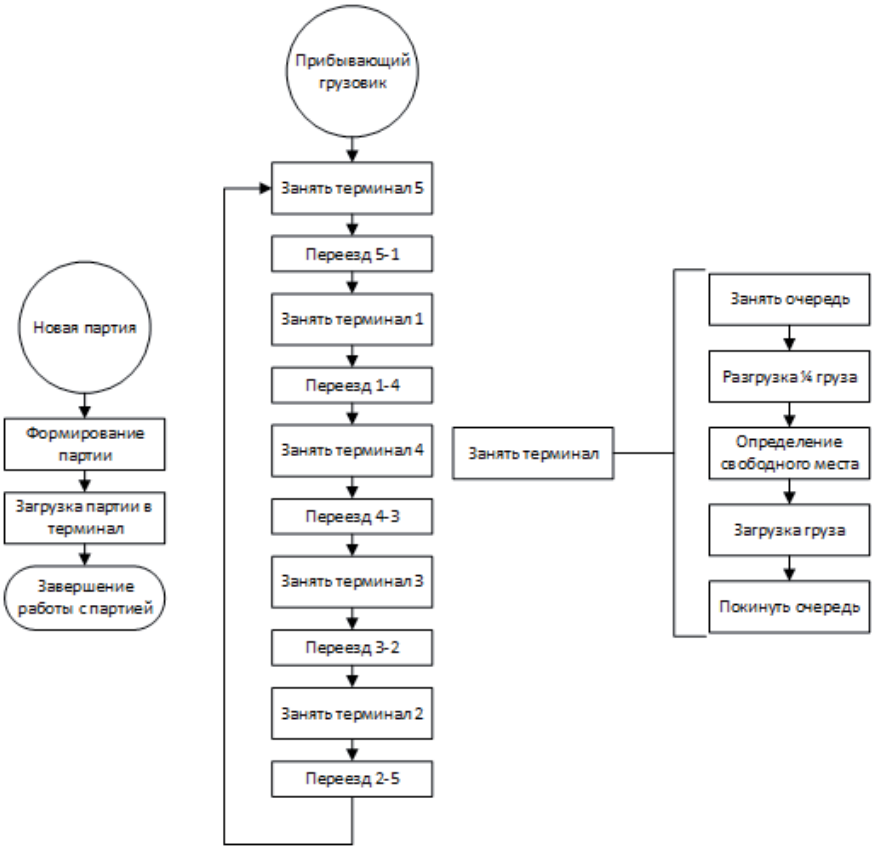
По данным карты строим табл. 5 для определения среднего времени переездов между терминалами для варианта 1: количество грузовиков 6, маршрут 34512.

По данным табл. 1 строим модель формирования запасов на терминалах. Терминалы моделируются многоканальными устройствами (МКУ) с емкостью, заведомо достаточной для размещения всех возможных грузов [4]. Текущее содержимое МКУ – имеющийся на текущий момент груз. Он увеличивается при поступлении партии, уменьшается по мере погрузки на грузовики и вывоза.

Таблица 5

Откуда, куда	Расстояние по карте в см	Расстояние между пунктами в км	Ср. время переезда, мин
3–4	9	17,3	41,5
4–5	13	25,0	60,0
5–1	24	46,2	110,9
1–2	9	17,3	41,5
2–3	19	36,5	87,6

Блок-схема модели



Строим GPSS-модель формирования запасов на терминалах

```
*
term1   storage 10000
term2   storage 10000
term3   storage 10000
term4   storage 10000
term5   storage 10000

generate 47,23;          terminal #1
assign 12,(uniform(5,24,70));     size of the party
enter term1,p12;                  download
terminate

generate 27,10;          terminal #2
assign 12,(uniform(5,13,35));     size of the party
enter term2,p12;                  download
terminate

generate 32,18;          terminal #3
assign 12,(uniform(5,34,68));     size of the party
enter term3,p12;                  download
terminate

generate 41,15;          terminal #4
assign 12,(uniform(5,20,46));     size of the party
enter term4,p12;                  download
terminate

generate 48,19;          terminal #5
assign 12,(uniform(5,33,73));     size of the party
enter term5,p12;                  download
terminate
```

Далее в соответствии с вариантом нужно смоделировать движение грузовиков.

Итак, 6 грузовиков, все они в начале в терминале № 3, маршрут 34512.

```
initial  X$numt,4;       numb of terminals = 5-1 = 4
```

Переход в начало, в зону деклараций

```
generate 0,,,6;  gen 6 trucks in 3
assign 4,0;      p4 = the truck is empty
entr3   assign 5,(p4/X$numt);    p5 = num unload
assign 4-,p5;    the rest in truck
assign 6,(100-p5);       free capacity
test le s$term3,p6,next3

assign 4 +,s$term3;      loading1
leave term3,s$term3
advance (s$term3#1),( s$term3#0.5)
transfer,next4

next3   assign 4 +,p6;   loading2
leave term3,p6
advance (p6#1),(p6#0.5)

next4   enter term3,p5; unloading
advance (p5#1),(p5#0.5)
way34   advance (exponential(5,0,41,5)); way34
transfer,entr4
```

Этот программный блок повторяется для каждого терминала с заменой параметров на специфические для него, в конце последнего переход на вход первого……

```
*       generate 0,,,6;  gen 0 trucks in 4
*       assign 4,0;      p4 = the truck is empty
entr4….
……
```

Задание времени моделирования

```
generate 120000;         time control
terminate 1
```

Результаты моделирования

```
QUEUE MAX CONT. ENTRY ENTRY(0) AVE.CONT. AVE.TIME
AVE.(-0)
OH5 1  0 143  15 0.122  102.403 114.404
OH1 5  0 203  14 0.292  172.458 185.233
OH4 6  0 203  12 0.330  194.818 207.058
OH3 7  0 203  10 0.637  376.602 396.115
OH2 8  8 203  9 5.904  3490.023 3651.931

где MAX - максимальная длина очереди в
терминале, AVE.TIME - время простоя.
```

Полученная модель не является оптимальной.

Проводим оптимизацию модели на GPSSW [5].

Для оптимизации работы системы была введена операция Test, которая отправляет грузовик на следующий терминал, если текущий терминал занят.

```
QUEUE MAX CONT. ENTRY ENTRY(0) AVE.CONT. AVE.TIME
AVE.(-0)
OH5 1  1 322  15 0.775  288.773 302.882
OH1 1  1 317  14 0.774  292.891 306.423
OH4 1  1 317  12 0.786  297.689 309.401
OH3 1  1 278  9 0.812  350.572 362.302
OH2 1  1 168  8 0.895  639.200 671.160
```

После оптимизации системы можно сделать вывод, что очередь практически отсутствует, а время ожидания стало гораздо меньше, все терминалы загружены нормально.

Отчет по курсовому проекту должен содержать:

1. Постановку задачи.
2. Структурную схему.
3. Выбор единицы модельного времени.
4. Текст модели на GPSSW.
5. Отчет по результатам моделирования.
6. Текст оптимизированной модели на GPSSW.
7. Отчет по результатам моделирования оптимизированной модели.

Как видно из вышесказанного, спиральный принцип приобретения компетенций позволяет сформировать у студента мотивацию при изучении задач компьютерного моделирования. На каждом следующем витке студент имеет возможность включиться в творческий процесс, ис-

пользуя приобретенные ранее знания. Это мотивирует получать знания всю жизнь.

Библиографический список

1. *Мунасыпов Н. А.* Линейное программирование. Оренбург: Пресса, 2015. 122 с.

2. *Охорзин В. А.* Компьютерное моделирование в системе MathCAD. М.: Финансы и статистика, 2006.

3. *Бражник А. Н.* Имитационное моделирование: возможности GPSS World. СПб.: Реноме, 2006. 439 с.

4. *Боев В. Д.* Инструментальные средства GPSS World: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.

5. GPSS World: учеб. пособие по GPSS World, 2002.

УДК 629.735.33

А. А. Малашин
доктор физико-математических наук, профессор
Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

А. В. Чернышов
кандидат технических наук, доцент
Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

Д. В. Виноградов
кандидат технических наук, доцент
Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

ЭКОСИСТЕМА МАЛЫХ РОБОТОВ КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

В статье изложена концепция построения учебного процесса в техническом вузе на основе экосистемы малых роботов, к созданию и управлению которой в той или иной степени привлекаются студенты технических специальностей всех курсов. Реализация концепции предполагает внесение соответствующих изменений в учебные планы потоков обучающихся.

Ключевые слова: *роботы, центр управления движением, учебный процесс.*

A. A. Malashin
Dr., Sc., Phys.-Math., Professor
Mytiscthi Branch of Bauman Moscow State Technical University

A. V. Chernyshov
Phd, Tech., Associate Professor
Mytiscthi Branch of Bauman Moscow State Technical University

D. V. Vinogradov
Phd, Tech., Associate Professor
Mytiscthi Branch of Bauman Moscow State Technical University

ECOSYSTEM OF SMALL ROBOTS AS THE BASIS OF STUDYING IN TECHNICAL UNIVERSITIES

We consider a conception of studying process in technical universities based on a system of small robots. Students of different specialties and courses are involved in creating and controlling of the robots. The realization of the concept is supposed some changes in the basic courses of universities.

Keywords: *robots, mission control center, studying process.*

Введение

Одной из важных задач педагогического процесса в вузе является создание таких условий обучения, при которых студенты, не отрываясь от учебного процесса, уже с первого курса были бы приобщены к техническому творчеству под руководством преподавателей выпускающих кафедр в рамках студенческих конструкторских бюро (СКБ).

Постоянная работа в СКБ, связанная с необходимостью решения самых разнообразных теоретических и практических задач, способствует развитию инженерного мышления и навыков, расширению кругозора, пониманию неразрывной, глубокой взаимосвязи инженерных наук

между собой и с математикой и физикой, что в итоге побуждает студента к глубокому изучению теоретических и технических дисциплин, предусмотренных учебным планом, т. е. способствует выполнению главной задачи вуза – повышению качества образования.

Одним из направлений работы СКБ, привлекательным для молодежи и перспективным с точки зрения дальнейшей востребованности выпускников вуза в промышленности, является робототехника. В частности, на наш взгляд, активному вовлечению студентов в творческую, инженерную работу может способствовать применение и развитие в учебном процессе концепции экосистемы малых роботов.

Концепция экосистемы малых роботов

Идея концепции состоит в том, чтобы предложить всем студентам, начиная с первого курса, проявить свои творческие технические способности в области робототехники. Предполагается, что студенты каждой группы делятся на творческие бригады. В состав одной бригады могут входить от одного до трех-четырех человек. Бригада выбирает себе направление исследования и/или разработки. Это может быть любой вопрос из следующего перечня:

– создание собственной подвижной робоплатформы;

– создание бортового блока (подсистемы) для подвижной робоплатформы;

– создание блока полезной нагрузки для робоплатформы;

– создание элемента инфраструктуры для экосистемы робоплатформ;

– создание программной модели любой подсистемы из перечисленных выше;

– создание модуля программного обеспечения для контура управления экосистемой роботов.

По мере возникновения потребности студентам для решения могут быть предложены и другие задачи.

Вид и тип движителя робоплатформы бригада выбирает сама. Это могут быть:

– гусеничный, колесный, шаговый, вибрационный и др. типы;

– для движения по полу, стенам, окнам, потолку, по воздуху (дрон).

Для реализации своего замысла бригада может использовать появившиеся совсем недавно и уже широкодоступные на рынке, готовые (фактически стандартные), относительно недорогие компоненты на базе микроконтроллерных плат типа Arduino и/или одноплатных ЭВМ типа Raspberry Pi, а также широкий спектр выпускаемого для них подключаемого оборудования (датчики, средства беспроводной связи, исполнительные механизмы). Практика показывает, что для сборки базовой платформы, которая сразу сможет передвигаться (правда, без дистанционного управления, то есть на достаточно примитивном уровне), бригаде требуется около месяца-двух с учетом приобретения компонентов в интернет-магазине за рубежом (что обходится дешевле) и почтовой доставки, после чего у нее появляется объект, свойства которого можно бесконечно совершенствовать, добавляя различные элементы.

Бригада может не разрабатывать свою платформу, а взяться за решение какой-либо задачи, необходимой для всех платформ определенного типа. Например, значительную сложность представляет задача создания системы компьютерного зрения с распознаванием образов для роботов на основе обработки видеопотока, работающей в реальном масштабе времени.

В результате каждая учебная группа должна будет за время обучения в вузе создать несколько работоспособных роботов относительно небольшого размера, каждый из которых будет решать какую-либо задачу небольшой или средней сложности, полезную для вуза. К числу таких задач могут относиться (но не ограничиваясь только ими):

– измерение параметров окружающей среды с целью экологического мониторинга помещений вуза: температуры, влажности, повышенной концентрации CO_2 в воздухе, запыленности воздуха, уровня напряженности электромагнитного поля и т. п.;

– мониторинг состояния помещений вуза (например, фиксация утечек тепла через окна, определение неисправных ламп освещения, проблем с электропроводкой и т. п.);

– непрерывное поддержание в чистоте коридоров и помещений вуза [1];

– сопровождение по корпусам гостей вуза (довести до заданного помещения, проводить к выходу, провести для гостей экскурсию по вузу и т. п.);

– организация мобильных точек доступа к Wi-Fi для временного расширения сети при проведении различных экспериментов и мероприятий;

– техническое обслуживание других роботов (например, робот-эвакуатор для доставки робота с севшим аккумулятором на станцию зарядки или неисправного робота в сервис).

Могут быть предложены (придуманы самими студентами) и другие задачи.

Таким образом, множество роботов, решающих разные задачи и функционирующих, например, в одном учебном корпусе (или в нескольких учебных корпусах) создадут экосистему, которая обеспечит качественно новую учебную и бытовую обстановку в вузе.

Из необходимых элементов инфраструктуры могут быть названы:

– станции подзарядки аккумуляторов на каждом этаже;

– станция технического обслуживания и ремонта;

– Центр управления и планирования (ЦУП).

ЦУП представляется совершенно необходимым элементом инфраструктуры, призванным, во-первых, координировать работу роботов в экосистеме, а во-вторых, работа в ЦУПе должна стать обязательной составной частью учебного процесса. Созданные студентами роботы являются естественными объектами управления, аналогичными, например, малым искусственным спутникам Земли (ИСЗ), которые создаются некоторыми ведущими вузами [2, 3]. Однако в данном случае множество малых роботов могут быть получены гораздо быстрее и на несколько порядков дешевле, чем один ИСЗ. Фактически каждый робот может рассматриваться как планетоход (луноход, марсоход), на котором студентами могут и должны на практике (!) отрабатываться методы управления такими объектами. Более того, управление роботами (в отличие от ИСЗ) может быть без каких-либо ограничений и условностей доверено самим студентам.

Структурно ЦУП состоит из Главного серверного узла (ГСУ) и нескольких залов управления. ГСУ обеспечивает:

– связь с роботами через элементы инфраструктуры локальной компьютерной сети вуза;

– получение информации от роботов;

– определение текущего местоположения каждого робота;

– хранение текущей и ретроспективной информации о функционировании каждого робота;

– обработку информации, поступившей от бортовых систем роботов и от блоков их полезной нагрузки;

– формирование тематических форм отображения информации для залов управления.

Залы управления обеспечивают необходимый уровень контроля за функционированием экосистемы роботов в вузе.

Реализация программного обеспечения ГСУ и ЦУП в целом должна предусматривать использование в качестве залов управления обычных компьютерных классов. Обычно в каждом компьютерном классе имеется несколько ПЭВМ, объединенных локальной сетью, что позволяет реализовать рабочие места операторов отдельных бортовых систем, а также компьютерный проектор, который возможно использовать как средство коллективного отображения информации (КСО).

Среди залов управления должен быть выделен Главный зал управления (ГЗУ), предназначенный для работы группы анализа и планирования, контролирующей всю экосистему роботов и инфраструктуры.

Особенности планирования учебного процесса

Наличие постоянно действующей экосистемы роботов требует постоянного контроля и управления их деятельностью. С этой целью должны быть реализованы регулярные дежурства смен управления, составленные из самих студентов. Причем студенты, образующие смены, должны будут управлять и «своими», и «не своими» роботами.

По всей видимости, студенты первого курса еще не могут принимать в дежурствах участие, поскольку им необходимо время на получение знаний, необходимых для управления входящими в экосистему роботами. Им необходимо сначала создать своего робота, способного стать частью экосистемы, что позволит им познакомиться с принятыми в экосистеме интерфейсами, форматами команд и данных.

Со второго курса студенты должны принимать участие в работе дежурных смен. С этой целью в их учебном плане необходимо предусмотреть распределенную практику. Практика должна быть распределена на все старшие курсы.

На каждый учебный семестр может формироваться постоянный состав каждой дежурной смены либо может быть применена процедура «составления смен», на которых составы смен формируются и объявляются динамически. Каждый студент в смене за время практики должен отработать на нескольких рабочих местах, для чего в расписании практики должны быть предусмотрены как дни дежурства, так и дни подготовки и самоподготовки, а также дни сдачи зачетов для допуска к заступлению на смену. Для соблюдения этого порядка необходима разработка специального регламента.

Обязательной частью регламента должен быть анализ работы каждой смены по окончании ее дежурства.

Одну смену должны составлять студенты разных курсов. Так, например, студенты второго курса должны заступать на смену операторами рабочих мест, студенты третьего курса могут заступать на смены в составе специальных бригад по техническому обслуживанию роботов и инфраструктуры экосистемы, студенты четвертого курса должны заступать как сменные руководители, а также участники Группы анализа и планирования. Магистранты могут привлекаться к работе смен в рамках их научной тематики.

Технические основы создания в вузе экосистемы студенческих роботов

На первый взгляд может показаться, что для объединения студенческих роботов в экосистему и для создания ЦУП потребуются значительные капитальные вложения. В действительности практически все элементы необходимой инфраструктуры уже имеются в современном вузе.

Так, в качестве опорной сети передачи информации для организации взаимодействия роботов

друг с другом и с ЦУП может быть использована сеть Wi-Fi, обычно уже имеющаяся в корпусах большинства современных вузов. В качестве залов управления, как уже было сказано выше, могут использоваться общевузовские и/или компьютерные классы кафедр. ГСУ может быть реализован на базе обычно имеющегося в вузе интернет-центра. В крайнем случае роль сервера ГСУ может играть любой серверный компьютер, обычно имеющийся почти в каждом компьютерном классе (по крайней мере, на первом этапе создания экосистемы роботов, когда роботов еще немного и информационные потоки не достигли значительных объемов).

Важным обстоятельством является необходимость создания системы соглашений о передаче информации (интерфейсов) между роботами и ЦУПом, которые были бы понятны и просты в реализации, чтобы в них могли разобраться и реализовать их в своих разработках даже первокурсники. С этой целью необходимо развертывание общедоступного сервера документации (можно даже в облаке на каком-либо бесплатном сервисе), которым могли бы пользоваться все участники процесса.

Крайне важно добиваться от студентов, ведущих какие-либо разработки, регулярного документирования результатов своего труда, что не только позволит всем другим участникам комфортно «вписаться» в экосистему, но и явится важным фактором технического образования и воспитания.

Практическая реализация концепции

В настоящее время в МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана на кафедре ИУ-6, ведущей подготовку студентов по специальностям «Информатика и вычислительная техника» и «Прикладная математика и информатика», начата практическая работа по реализации описанной выше концепции. Кафедра готовит специалистов в области вычислительной техники, теоретической и прикладной информатики, возможными будущими рабочими местами которых являются предприятия ракетно-космического кластера г. Королева Московской области, в частности в Центре управления полетами в ЦНИИМАШ.

Силами студенческих инициативных групп, образовавшихся на всех курсах обучения бакалавров, уже создано четыре робоплатформы [доклады на «Политехнике», дипломы], которые в настоящее время используются для отработки различных вопросов автоматического и телеоператорного управления, а также взаимодействия с ЦУП. Проведенными с робоплатформами экспериментами доказана практическая возможность взаимодействия роботов с ЦУП через опорную Wi-Fi сеть, развернутую в учебном корпусе. Проведены первые сеансы удаленного управления роботом в телеоператорном режиме из компьютерного класса, в котором задействованы: ПЭВМ в качестве рабочих мест операторов и компьютерный проектор в качестве КСО.

Результатами работы других инициативных групп являются элементы инфраструктуры экосистемы (например, ПО базы данных ГСУ) и блоки бортовых систем (например, телеметрическая система на базе Arduino Uno, бортовая ЭВМ на базе Raspberry Pi).

Кафедра ведет работу по приведению учебных планов своих специальностей подготовки к форме, стимулирующей студентов к занятию робототехникой. В настоящее время в учебные планы уже включены некоторые специальные дисциплины, например «Основы робототехники», «Технологии ЦУП». Вносятся изменения в уже читаемые студентам курсы. Например, курс «Ассемблер ПЭВМ», в котором традиционно читались основы ассемблера процессора семейства Intel X86, дополняется сведениями по программированию микроконтроллера семейства Atmel, применяемого в Arduino. Студенты первого курса во время распределенной учебной практики обрабатывают потоки телеметрической информации, полученной с реальных роботов во время их испытаний.

Кафедра планирует внести изменения в порядок прохождения учебных и производственных практик старших курсов, чтобы с начала нового учебного года студенты могли выйти на реальные дежурства по управлению роботами в режиме смен.

Библиографический список

1. *Лазаревич А. В.* Повелитель Марса, 1992.

2. *Безрук Г. Г. Левкин И. М.* Операционный комплекс робототехнических систем информационного обеспечения воздушно-космического базирования. Робототехника и техническая кибернетика, 2016. № 4. С. 32–37.

3. Технология Lego Mindstorms NXT в обучении студентов основам адаптивного управления / А. А. Бобцов, Ю. А. Капитанюк, А. А. Капитонов и др. // Науч.-техн. вестник Санкт-Петербург. госуд. ун-та информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71).

УДК 369.032

Е. А. Шумаева[1]
кандидат наук по государственному управлению, доцент

Г. С. Джура[2]
магистр
[1,2]Донецкий национальный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ЕДИНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

В статье исследовано место информационных ресурсов и технологий в государственном управлении, представлена структура информационной среды управленческой деятельности, сформулированы цели, проблемы формирования и развития единого государственного информационного пространства, предложены мероприятия по созданию условий для функционирования единого государственного информационного пространства.

Ключевые слова: *информационные технологии, государственное управление, информационное обеспечение, единое государственное информационное пространство.*

E. A. Shumaeva[1]
PhD in Public Administration, Associate Professor

G. S. Dzhura[2]
Postgraduate Student
[1,2]Donetsk National Technical University

FEATURES OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF UNIFORM STATE INFORMATION SPACE

In article the place of information resources and technologies in public administration is investigated, the structure of the information environment of administrative activity is presented, the purposes, problems of formation and development of uniform state information space are formulated, actions for creation of conditions for functioning of uniform state information space are offered.

Keywords: *information technologies, public administration, information support, uniform state information space.*

В последние десятилетия мир переживает переход от индустриального общества к обществу информационному, сопровождающийся кардинальной сменой способов производства, мировоззрения людей, межгосударственных отношений. Уровень развития информационного пространства общества решающим образом влияет на экономику, обороноспособность и политику страны. От этого уровня в значительной степени зависит поведение людей, формирование общественно-политических движений и социальная стабильность государства [1].

Целью исследования является определение проблем формирования и особенностей развития единого государственного информационного пространства.

Мировой опыт совершенствования государственного управления подтверждает, что информационно-аналитическое обеспечение следует рассматривать как одно из стратегических направлений повышения эффективности деятельности на всех уровнях: государственном, отраслевом, региональном, международном и др. С системной точки зрения концепция информационного обеспечения органов государственной власти и управления основана на представлении о государстве как о сложной многофазной операционной системе, включающей в себя упорядоченное множество объектов организационного управления [2].

Использование информационных технологий имеет огромное значение для повышения конку-

рентоспособности государства и эффективности работы органов государственного управления и местного самоуправления. Поэтому информатизация органов государственной и муниципальной власти сегодня является одной из приоритетных задач руководства страны [3].

Главным ресурсом в информационном обществе становится именно информация, ее количество стремительно возрастает, ей отводится особая роль. Информация изначально выступает как обязательный элемент управленческой деятельности: от своевременности ее получения, полноты и достоверности зависит не только успех, но, более того, выживаемость любого предприятия или организации, причем в рыночных условиях роль данного фактора многократно возрастает.

В сфере государственного управления информационные технологии становятся ключевым фактором повышения эффективности управления, позволяя перейти на качественно новый уровень реализации всех функций государственного управления, прежде всего контроля, сбора и анализа информации, организации системы информационно-аналитического обеспечения выработки, принятия, реализации и оценки эффективности управленческих решений [4].

Информационные технологии способствуют установлению оперативной обратной связи между управленческими структурами и общественностью (с одной стороны, деятельность государственных органов становится более «прозрачной» для общественности, с другой – появляется возможность для оперативного учета общественного мнения и воздействия на него, в том числе по отдельным социальным группам). При этом предоставляется возможность свободного доступа широких слоев населения к информации и их активного участия в общественно-политической жизни страны [5].

Информационное обеспечение управленческой деятельности осуществляется на основе информационной системы организации путем использования недокументированной и документированной информации с помощью специальных технологий сбора, передачи, хранения, обработки и ее предоставления. На рис. 1 представлена схема информационной среды управленческой деятельности.

Информационная политика в целом как система отдельных политик не может формироваться в отрыве от социально-экономической стратегии. Если стратегия общества предполагает его быструю модернизацию, защиту прав человека, создание современной и развитой экономики, то формирование информационных политик должно строиться при несомненном приоритете информационной политики, ориентированной на удовлетворение реальных потребностей регионов и проживающих там людей.

Единое информационное пространство представляет собой совокупность баз и банков данных, технологий их ведения и использования, информационно-телекоммуникационных систем и сетей, функционирующих на основе единых принципов и по общим правилам, обеспечивающим информационное взаимодействие организаций и граждан, а также удовлетворение их информационных потребностей. Существенная роль в формировании единого информационного пространства отводится созданию общенациональной телекоммуникационной сети страны, которая позволит объединить различные сети, системы и комплексы средств связи, обеспечив потребителям доступ к соответствующим территориально распределенным информационным ресурсам, обмену информацией в режимах передачи данных и электронной почты.

Целями формирования и развития единого информационного пространства государства являются:

– обеспечение прав граждан на информацию, провозглашенных Конституцией;

– предоставление возможности контроля со стороны граждан и общественных организаций

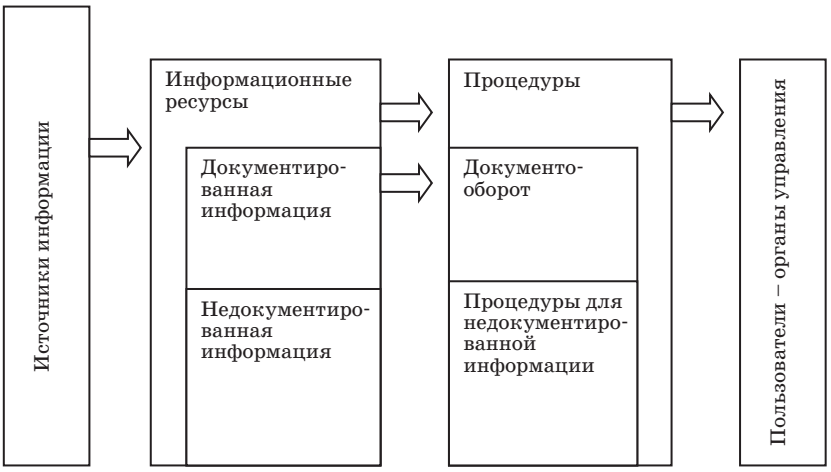


Рис. 1. Информационная среда управленческой деятельности

за деятельностью органов государственной власти и органов местного самоуправления;

– повышение деловой и общественной активности граждан путем предоставления равной с государственными структурами возможности пользоваться открытой научно-технической, социально-экономической, общественно-политической информацией, а также информационными фондами сфер образования, культуры и т. д.

Общегосударственным инструментом, обеспечивающим учет государственных информационных ресурсов, должен стать информационный регистр, в котором будут представлены описания информационных массивов, баз данных и других видов информационных ресурсов, создаваемых за счет бюджета. Использование государственного информационного регистра позволит существенно снизить затраты на создание и поддержание государственных информационных ресурсов.

С целью координации работ по формированию и развитию единого информационного пространства необходимо создать центры информатизации. Эти центры могут также выполнять на соответствующем уровне функции государственного информационного регистра и проводить работы по информационно-справочному обслуживанию юридических и физических лиц, сертификации систем и их элементов, лицензированию информационной деятельности. Общие затраты на формирование и развитие единого государственного информационного пространства будут складываться из затрат на программы развития отдельных направлений и составляющих этого пространства.

Необходима разработка процедуры финансирования данного проекта по отдельным направлениям, таким как развитие систем информатизации, формирование государственных информационных ресурсов широкого использования, развитие систем связи, развитие и обеспечение деятельности сети государственных депозитариев и др.

Проблема формирования и развития единого государственного информационного пространства и соответствующих государственных информационных ресурсов носит межотраслевой и межрегиональный характер, требует решения сложных организационно-технических вопросов, значительных затрат и не может быть решена быстро. Процесс формирования предполагает необходимость комплексного учета социально-экономических, правовых и политических проблем информатизации общества, проблем создания и применения информационных технологий и средств их реализации, использование организационного, технологического, технического и нормотворческого опыта, полученного при развитии информационных пространств ведущих стран мира.

Проблема создания единого государственного информационного пространства может быть успешно решена при наличии необходимой экономико-правовой основы, включающей:

– законодательные и нормативные акты, определяющие права и обязанности юридических и физических лиц по формированию и использованию информационных ресурсов, средств их обработки и доставки;

– экономические регуляторы, стимулирующие активное формирование и использование информационных ресурсов.

Формирование и развитие единого государственного информационного пространства предусматривает создание информационных ресурсов и средств оперативного доступа к ним. Формируемые информационные ресурсы, включаемые в единое информационное пространство, должны быть на законном основании доступны органам управления государственной власти, хозяйствующим субъектам и гражданам.

Единое информационное пространство по своей сути является открытой организационно-технологической системой, уровень развития которой во многом определяется реальными возможностями используемых средств сбора, обработки, распространения, хранения и поиска информации.

Действующие и разрабатываемые в настоящее время информационно-управляющие системы отдельных государственных органов власти и органов местного самоуправления, ведомственные и межведомственные территориально распределенные системы и сети сбора, обработки и распространения информации могут служить базой внедрения новых информационных технологии и обеспечить основу формирования единого государственного информационного пространства и гарантировать сопряжение инновационных технологий с традиционными средствами распространения информации и организации доступа к ней: печатные и электронные средства массовой информации, журнальные и книжные издания, библиотеки и архивы, почта, телеграф и пр.

В условиях недостаточного насыщения государственных органов современными средствами информатизации целесообразна организация системы депозитариев государственных информационных ресурсов, обеспечивающая возможность открытого доступа к информации физических и юридических лиц имеющимися традиционными средствами.

Выводы по проведенному исследованию. Таким образом, информационно-технологические нововведения в государственном и муниципальном управлении связаны с одновременным и согласованным использованием информационных, организационных, правовых, социально-психологических, кадровых, технических,

логико-семантических факторов. Все это требует комплексного подхода, качественного изменения как системы работы с информацией, так и функциональной и организационной структур управления, состава и структуры всей управленческой деятельности.

Библиографический список

1. *Бойко В. В.* Проектирование баз данных информационных систем: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2008. 194 с.

2. *Карпова Т. С.* Базы данных: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2009. 858 с.

3. *Ульман Дж. А.* Базы данных: учебник; под ред. Дж. С. Уидома. М.: Лори, 2012. 374 с.

4. Понятие баз данных [Электронный ресурс]. URL: http://www.site-do.ru/db/db1.php.

5. Система управления базами данных (СУБД), назначение и основные функции [Электронный ресурс]. URL: http://www.infosgs.narod.ru/31.htm.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акопов
Владимир Сергеевич –
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры управления в технических системах ГУАП.
Область научных интересов – управление локальными системами, моделирование движения транспортных средств.
(812)474-70-31; akopov@acts.aanet.ru

Андреева
Дарья Андреевна –
кандидат экономических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – экономика промышленности, экономика инвестиций, экономика труда, принятие управленческих решений.
+7(981)830-77-36;
a.d.andreeva@yandex.ru

Армашова-Тельник
Галина Семеновна –
кандидат экономических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – экономика и управление на предприятии, организация и планирование хозяйственной деятельности, социальная инфраструктура предприятия, управление персоналом.
(812) 317 84 24, +7(911) 738-63-37;
atgs@yandex.ru

Артикульный
Никита Владимирович –
студент факультета СПО.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Область научных интересов – системы автоматизации.
+7(812) 494-70-34; kaf32@guap.ru

Батрак
Андрей Петрович –
кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации, метрологии и управления качеством.
Сибирский федеральный университет.
Область научных интересов – исследование качества трансформаторного масла акустическим методом.
8(905)905-974-3328;
andrebatrak@mail.ru

Белов
Максим Николаевич –
начальник лаборатории ионизационных методов измерения параметров газовых сред.
Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики.
Область научных интересов – космическое приборостроение.
+7(921)362-78-61; m.belov@rtc.ru

Белоногов
Олег Борисович –
кандидат технических наук, доцент, начальник сектора ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.
Область научных интересов – расчеты характеристик и идентификация параметров электрогидравлических и электропневматических систем.
(495)511-75-44, +7(915)149-92-74;
obelonogoff@mail.ru

Болтнева
Анна Владимировна –
студентка кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электрические машины.
(812)494-70-34
Ann.boltneva@mail.ru

Бориков
Валерий Николаевич –
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой точного приборостроения.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет.
Область научных интересов – методы и средства измерений, программное обеспечение измерительных систем и микропроцессорных средств измерений, математическое моделирование измерительных алгоритмов и систем.
8(3822)60-64-89; +7(3822)701777
доп. 2756; borikov@tpu.ru

Брунов
Максим Сергеевич –
старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нечеткие регуляторы, пространство состояний, дискретные системы.
mak-brunov@yandex.ru

Булгаков
Александр Александрович –
старший преподаватель кафедры «Электрические системы».
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – электромагнитная совместимость, вероятностное и статистическое моделирование процессов в электрических сетях.
+38(095)73-74-175;
bulgakov-work@mail.ru

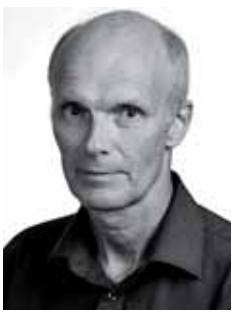
Бураков
Михаил Владимирович –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – нечеткое управление; нейронные сети; генетические алгоритмы.
bmv@sknt.ru

Буркина
Марина Михайловна –
кандидат экономических наук, доцент.
ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК), ученый секретарь.
Область научных интересов – история науки и техники.
8(931)-539-17-09; mburkina@yandex.ru

Бурлака
Владимир Владимирович –
кандидат технических наук, доцент секции автоматизации электрических систем, электротехники и электропривода кафедры электрификации промышленных предприятий.
Приазовский государственный технический университет.
Область научных интересов – разработка импульсных источников питания с интегрированными функциями активной фильтрации высших гармоник; разработка и совершенствование топологий силовой части и методов управления параллельными активными фильтрами; проблемы качества электроэнергии в импульсных преобразовательных системах; преобразователи частоты и системы частотного привода.
vburlaka@rambler.ru

Быкова
Александра Михайловна –
студентка.
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – системы управления и автоматика.
+38(066)07-70-570;
aleksandra-bykova@list.ru

Виграненко
Юрий Трофимович –
доктор химических наук, профессор кафедры химии.
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова.
Область научных интересов – гомогенный металлокомплексный катализ.
(812)552-31-11; lta4455@yandex.ru



Виноградов
Дмитрий Владимирович –
кандидат технических наук, доцент кафедры ИУ-6 МФ (компьютерные системы и сети).
Мытищинский филиал Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана.
Область научных интересов – робототехника.
+7(498) 687-43-52;
dmitry-vinogradov@yandex.ru

Ворочаев
Алесандр Валерьевич –
аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – проектирование и конструирование многозвенных систем.
(4712)22-2626;
sasha-vorochaev@yandex.ru

Ворочаева
Людмила Юрьевна –
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – многозвенные системы, моделирование мехатронных и робототехнических систем.
(4712)22-2626; mila180888@yandex.ru

Ганьшин
Юрий Анатольевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромагнитное поле, электромагнитная совместимость.
iyury40@rambler.ru

Герасимов
Александр Викторович –
профессор кафедры интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами, доктор технических наук, доцент.
Казанский национальный исследовательский технологический университет.
Область научных интересов – физика плазмы высокочастотного индукционного разряда.
(9033)05-41-58; (843)2314188;
gerasimov@kstu.ru

Голубков
Виктор Александрович –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – контроль и диагностика электромеханических систем.
viktor-golubkov@yandex.ru

Городецкий
Андрей Емельянович –
доктор технических наук, профессор, заведующей лабораторией «Интеллектуальные электромеханические системы».
Институт проблем машиноведения РАН.
Область научных интересов – математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.
g27764@yandex.ru

Горпинич
Александр Викторович –
кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации промышленных предприятий.
Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина.
Область научных интересов – надежность электроэнергетических систем; качество электроэнергии; оптимизация; прикладной искусственный интеллект.
gorpinich@ieee.org

Гришанов
Сергей Александрович –
старший преподаватель кафедры «Электрические системы».
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – моделирование в электрических системах; управление режимами ЭЭС; SmartGrid; FACTS.
+380(622)301-03-07;
serg@elf.donntu.org

Гуков
Дмитрий Васильевич –
доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения, электрооборудования и автоматики.
Военный институт (инженерно-технический) федерального государственного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии Хрулева А. В.»
Область научных интересов – электромеханика.
(812)430-95-19; +7(911)754-57-85;
guokovdmitry@rambler.ru

Гулаков
Сергей Владимирович –
доктор технических наук, профессор, декан сварочного факультета.
Приазовский государственный технический университет.
Область научных интересов – разработка автоматизированных систем управления сварочными процессами, сварочных источников питания; разработка технологии наплавки слоев с регламентированным распределением рабочих свойств.
+38(097)075-45-41; gulakov_s_v@pstu.edu

Гуревич
Виктор Элизарович –
кандидат технических наук, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов.
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ).
Область научных интересов – цифровые системы автоматического управления и передачи информации.
дом. (812)370-85-42;
раб. (812)323-58-95; gurvic23@mail.ru

Денисов
Александр Вадимович –
аспирант, мл. научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.
Область научных интересов – робототехника, теория систем автоматического управления, теория моделирования.
+7(812)328-04-21; denisov@iias.spb.su

Джукич
Даниэл Йорданович –
инженер 2-й категории.
АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург.
Область научных интересов – системы управления скоростью и следящие системы.
+7(921)983-03-87; ddi791@mail.ru

Джура
Георгий Сергеевич –
магистр.
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – оценка эффективности государственного управления.
+3 8(062)301-03-41

Долгих
Антонина Геннадьевна –
ассистент кафедры точного приборостроения.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет.
Область научных интересов – использование численных методов при исследовании электромеханических элементов.
+7(3822)70-17-77 доп. 1689;
сот. 89234262629; ivanovatonya@tpu.ru

Дробов
Андрей Владимирович –
магистр технических наук, аспирант.
Белорусский государственный университет транспорта.
Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника.
мтс (+37529)533-84-16;
vel (+37529)382-93-77;
electr_to@mail.ru;
techconference@mail.ru

Дружинин
Василий Григорьевич –
ведущий конструктор.
Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики.
Область научных интересов – космическое приборостроение и робототехника, физическая механика.
+7(914)685-58-56;
Vasily.dr.mob@gmail.com

Евсеев
Евгений Владимирович –
Заведующий учебно-лабораторным комплексом УЛК3 Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике ГУАП.
Область научных интересов – радиоэлектроника, интеллектуальные системы автоматического управления.
(812)474-70-31; eev@guap.ru

Елтышев
Борис Константинович –
кандидат технических наук, доцент кафедры судовой автоматики и измерений.
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.
Область научных интересов – имитационное моделирование сложных систем.
+7(950)044-66-00; bkelt1@yandex.ru

Елтышева
Ирина Владимировна –
старший преподаватель.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – становление практико-ориентированного направления в образовании.
(812)494-70-32; +7(921)758-44-59;
eltiv1@yandex.ru

Ефимов
Александр Андреевич –
доктор технических наук, профессор кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – силовая электроника, электропривод.
efa33@aanet.ru

Жукова
Наталья Викторовна –
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации».
Донецкий национальный технический университет «ДонНТУ», Донецк.
Область научных интересов – автоматизация, электропривод непрерывных прокатных станов, моделирование и управление технологическими процессами.
Zhnatka@mail.ru;
nataliazhukova1973@gmail.com

Загуляев
Сергей Дмитриевич –
курсовой офицер-преподаватель факультета строительства военно-морских баз.
Военный институт (инженерно-технический) федерального государственного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева».
Область научных интересов – электромеханика.
+7(921)575-69-20;
zagulyaev.sd@yandex.ru

Зайцев
Александр Андреевич –
инженер-конструктор 3-й категории.
ФГУП «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург.
Область научных интересов – системы управления скоростью и следящие системы.
+7(905)203-51-29;
89052035129@yandex.ru

Зубкова
Анна Николаевна –
старший преподаватель кафедры программно-целевого управления в приборостроении.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – менеджмент в электроэнергетике, управление качеством в электроэнергетике.
+7(981)782-27-24; Zubkova-an@bk.ru

Ильин
Леонид Максимович –
студент факультета СПО.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматизации.
+7(812) 494-70-34; kaf32@guap.ru

Ичетовкин
Егор Андреевич –
бакалавр, старший оператор научной роты.
1-я научная рота ВМФ.
Область научных интересов – математическое моделирование.
8(981)886-03-48;
Mels_engineer@mail.ru

Кавтрев
Сергей Сергеевич –
ведущий конструктор.
Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики.
Область научных интересов – космическое приборостроение и робототехника.
+7(952)245-77-96; s.kavtrev@rtc.ru

Казарян
Карен Геворгович –
аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – многозвенные системы, системы управления, моделирование робототехнических систем.
(4712)22-2626; granit-kursk@mail.ru

Кирпичников
Александр Петрович –
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами.
Казанский национальный исследовательский технологический университет.
Область научных интересов – физика плазмы высокочастотного индукционного разряда.
(843)231-41-87; (843)231-41-88;
kirpichnikov@kstu.ru

Коваленко
Анна Валериевна –
ассистент кафедры «Электрические станции».
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – электрические станции; возобновляемые источники; релейная защита и автоматика, САПР.
+38 (062)301-03-072;
anna.kovalenkoetf@gmail.com

Колесников
Валерий Васильевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электромеханическое преобразование энергии в электромеханотронных системах; математическое моделирование, расчет и диагностика электрических машин и электронных устройств управления.
efa33@aanet.ru

Кондратьев
Эдуард Юрьевич –
главный энергетик.
ООО «Газпром добыча Ямбург».
Область научных интересов – моделирование индукционных нагревательных систем.
8(919)550-40-16; e_self@rambler.ru

Конев
Александр Александрович –
магистрант, техник кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – компьютерное моделирование электротехнических установок.
8(987)486-54-65; sashaknv@gmail.com

Конесев
Сергей Геннадьевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий.
Уфимский государственный нефтяной технический университет.
Область научных интересов – моделирование многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов и электротехнических устройств на их основе.
8(917)342-02-95; konesevsg@yandex.ru

Косулин
Владимир Дмитриевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Область научных интересов – вентильные электродвигатели постоянного тока.
+7(981)88-6-41; vdk.spb@mail.ru

Кочерегин
Сергей Борисович –
кандидат химических наук, доцент кафедры химии.
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова
Область научных интересов – электрохимия, растворы, ионная проводимость, ион-селективные электроды.
8(911)995-18-55; lta4455@yandex.ru

Криволапчук
Игорь Григорьевич –
старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управления.

Кручинина
Ирина Юрьевна –
доктор технических наук.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук.
Область научных интересов – электрические машины, возобновляемые источники энергии, химические источники тока.
(812)325-40-79; ikruch@isc.nw.ru

Крылова
Татьяна Егоровна –
старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – гомогенные каталитические системы.
(812)306-98-78; +7(921)795-90-96;
Krylova_tatjana@mail.ru

Кузов
Михаил Юрьевич –
младший научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.
Область научных интересов – захватные устройства, системы очувствления, робототехника.
+7(921)359-30-28; mhkz@mail.ru

Курбанов
Вугар Гариб Оглы –
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления с искусственным интеллектом.
vugar_borchali@yahoo.com

Ларин
Павел Сергеевич –
командир научной роты.
1-я научная рота ВМФ.
Область научных интересов – ядерная энергетика.
8(931)371-72-51;
t9313717251@gmail.com

Лукашенко
Владислав Владиславович –
ФГБОУ ВО Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина.
Область научных интересов – распределенные вычисления на нейрокомпьютерах.
8(953)743-47-76;
v.lukashenko@nstlabs.net

Лукьяненко
Ирина Николаевна –
кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и механики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – контроль и диагностика электромеханических систем.
Irina.n.lukyanenko@gmail.com

Любимцев
Александр Сергеевич –
научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук.
Область научных интересов – электромеханика, математическое моделирование электромагнитных, тепловых и механических проблем.
(812)328-16-91; alex@tor.ru

Ляшенко
Александр Леонидович –
кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – анализ и синтез систем с распределенными параметрами частотными методами.
akuna_matata_kmv@mail.ru

Малашин
Алексей Анатольевич –
доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры ИУ-6 МФ «Компьютерные системы и сети», заведующий секцией.
Мытищинский филиал Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана.
Область научных интересов – динамические задачи механики.
8(917)510-87-16; malashin@mgul.ac.ru

Малинин
Александр Маркович –
доктор экономических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный экономический университет, профессор кафедры региональной экономики и природопользования.
Область научных интересов – региональная экономика, экономика сферы услуг.
+7(921)955-68-05; (812)310-47-29

Малов
Дмитрий Александрович –
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.
Область научных интересов – анализ данных, интернет вещей, передача мультимедийных данных.
+7(931)358-83-78;
malovdmitrij@gmail.ru

Малофеев
Евгений Александрович –
инженер.
ООО «Новая Энергия».
Область научных интересов – экология и энергетика, камера сгорания вихревого противоточного типа.
+7(905)631-11-52;
Evgeni_malofeev140292@mail.ru

Мартемьянов
Владимир Михайлович –
кандидат технических наук, доцент кафедры точного приборостроения.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет.
Область научных интересов – исследование и разработка электромеханических приборов и систем.
+7(3822)701777 доп. 1651;
сот. 8(913)852-58-91;
martemjanov@tpu.ru

Мартынов
Александр Александрович –
кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и электромеханики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – силовая электроника и электрический привод.
(812)494-70-34; +7(960)269-11-26;
Martynov41@mail.ru

Мельников
Сергей Юрьевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электротехника, электроника, шаговые электродвигатели, диагностика мехатронных систем.
sburime@mail.ru

Назаров
Дмитрий Игоревич –
аспирант.
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН).
Область научных интересов – моделирование, планирование операций.
(812)328-01-03; +7(812)328-44-50;
+7(911)288-65-41;
dmnazarov23@gmail.com

Николаев
Юрий Сергеевич –
кандидат химических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – гетерогенное равновесие.
nikolaev51@bk.ru

Никулин
Олег Викторович –
кандидат технических наук.
ООО «УК «Татбурнефть», г. Альметьевск.
Область научных интересов – электротехнические комплексы буровых установок.
+7(917)255-12-34; oleg309@yandex.ru

Новиков
Максим Олегович –
специалист, оператор научной роты.
1-я научная рота ВМФ.
Область научных интересов – конструирование и 3D-моделирование.
8(921)551-36-13; 3dmak@mail.ru

Новиков
Сергей Анатольевич –
Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева.
Область научных интересов – трансформаторы, электродвигатели.
+7(921)582-10-27; nsa_spb@mail.ru

Павлюк
Никита Андреевич –
младший научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.
Область научных интересов – робототехника, мехатроника, манипуляторы, педипуляторы.
8 (981)805-86-09;
antei.hasgard@gmail.com

Палицын
Владимир Александрович –
аспирант.
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН).
Область научных интересов – моделирование, планирование операций.
(812)328-01-03; +7(812)328-44-50;
vlad_palizin@mail.ru

Пальцева
Валентина Владимировна –
мл. научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук.
Область научных интересов – электромеханика, математическое моделирование электромагнитных, тепловых и механических проблем.
(812)328-16-91; valya_vp@bk.ru

Пахунов
Антон Сергеевич –
ведущий специалист отдела закупок, аспирант.
АО «РПКБ».
Область научных интересов – системы видения, сочетание изображений, виртуальная модель местности, человеко-машинные интерфейсы, авиационные системы, бортовая авионика, комбинированные системы видения, синтезированная система видения.
(915)450-23-70; anton@post.vg

Першин
Иван Митрофанович –
профессор.
Южный федеральный университет.
Область научных интересов – системы с распределенными параметрами.
8(918)790-36-19; ivmp@yandex.ru

Полилов
Егор Владимирович –
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем им. проф. А. Б. Зеленова.
Донбасский государственный технический университет, Алчевск.
Область научных интересов – релейное нейросетевое управление многомассовыми электромеханическими системами в условиях параметрической неопределенности.
egor.polilov@gmail.com

Политов
Евгений Николаевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – теория механизмов и машин, техническая механика, моделирование мехатронных систем.
(4712)22-2626;
politovyevgeny@rambler.ru

Положенцев
Дмитрий Сергеевич –
инженер 1-й категории.
АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург.
Область научных интересов – системы автоматического управления, силовой электропривод.
+7(904)647-65-64;
pds6476564@yandex.ru

Полякова
Татьяна Геннадьевна –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах ГУАП.
Область научных интересов – интеллектуальные системы автоматического управления.
tgp@acts.aanet.ru; (812)474-70-31

Поминов
Сергей Геннадьевич –
капитан-лейтенант, адъюнкт кафедры военного кораблестроения, специалист.
ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия».
Область научных интересов – военное кораблестроение.
8(921)871-02-86;
pominovsg@gmail.com

Решетникова
Наталия Викторовна –
ассистент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управления.
kaf31guap@gmail.com

Романчук
Виталий Александрович –
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина.
Область научных интересов – оптимизация вычислительных процессов нейрокомпьютерных систем.
8(920)635-11-56;
v.romanchuk@rsu.edu.ru

Рыбакова
Анна Константиновна –
конструктор 2-й категории.
Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики.
Область научных интересов – конструирование и технология электронных средств.
rybakova_anna1@mail.ru

Сабирова
Фарида Радиковна –
аспирант кафедры интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами.
Казанский национальный исследовательский технологический университет.
Область научных интересов – физика плазмы высокочастотного индукционного разряда.
(905)318-11-31; (843)231-41-88;
faridasabirova@mail.ru

Савельев
Антон Игоревич –
кандидат технических наук.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.
Область научных интересов – пиринговые сети, передача мультимедийных данных, робототехника, «Интернет вещей».
+7(952)249-65-44;
saveliev.ais@yandex.ru

Савин
Сергей Игоревич –
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – системы управления многозвенными системами, моделирование мехатронных систем.
(4712)22-2626; sergey89mkgtu@mail.ru

Салова
Ирина Александровна –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование методом конечных элементов.
salova_irine@mail.ru

Сасаров
Виталий Александрович –
инженер.
ООО «Новая Энергия».
Область научных интересов – импульсный источник питания, разряд в нефти, снижение вязкости нефти.
+7(906)638-57-52; mr.vitalii@mail.ru

Секацкий
Виктор Степанович–
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и управления качеством.
Сибирский федеральный университет.
Область научных интересов – исследование качества трансформаторного масла акустическим методом.
8(913)521-50-54;
sekackiy@rambler.ru

Семенова
Вероника Алексеевна –
кандидат экономических наук, профессор кафедры информатики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергоэффективность и энергосбережение.
+7(911)9767871; 9767871@mail.ru

Слободяник
Александра Сергеевна –
инженер.
ООО «Новая Энергия».
Область научных интересов – импульсный источник питания, разряд в нефти, снижение вязкости нефти.
+7(910)963-98-78; allex1s@mail.ru

Смирнов
Петр Алексеевич –
младший научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.
Область научных интересов – робототехнические системы.
8(911)262-96-39;
petruha.smirnov.1994@gmail.com

Соколов
Борис Владимирович –
доктор технических наук, профессор, заместитель директора СПИИРАН по научной работе.
ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН).
Область научных интересов – разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем.
(812)328-01-03; +7(812)328-44-50;
sokol@iias.spb.su

Соленая
Оксана Ярославовна –
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности; развитие методов оценки безопасности технологических объектов.
+7 (981)707-41-75; osolenaya@list.ru

Соленый
Сергей Валентинович –
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – электро-, пожаро- и взрывобезопасность; развитие систем «Умный дом» и Smart Grid; надежность сложных по структуре схем систем электроснабжения.
+7(812)494-70-34;
ssv555ssv@yandex.ru

Тарасова
Ирина Леонидовна –
кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН.
Область научных интересов – компьютерное моделирование, системы управления.
g17265@yandex.u

Тимофеев
Сергей Сергеевич –
старший преподаватель кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – сверхпроводимость, нанотехнологии, электрические машины, автоматические системы проектирования.
kaf_32@aanet.ru

Ткаченко
Сергей Николаевич –
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрические станции».
Донецкий национальный технический университет.
+38(062)301-03-072; tsn1981@mail.ru

Трубенева
Светлана Николаевна –
старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальная собственность, альтернативная энергия, электрические машины.
(812)494-70-31; kaf_32@aanet.ru

Турубанов
Михаил Александрович –
ассистент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники, ведущий инженер АО ЛОМО.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровые системы управления; встраиваемые системы; сверхпроводимость.
mturubanov@gmail.com

Турубанова
Марта Викторовна –
студентка кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровые системы управления; встраиваемые системы.
+7(962)680-98-84;
marta_vilze@yandex.ru

Тюрюмина
Анастасия Владимировна –
аспирант кафедры стандартизации, метрологии и управления качеством.
Сибирский федеральный университет.
Область научных интересов – исследование качества трансформаторного масла акустическим методом.
8(983)503-76-82; eternity17@list.ru

Федоренко
Андрей Григорьевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – проблемы повышения точности многополюсных вращающихся трансформаторов.

Фомичева
Татьяна Ивановна –
кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – неорганическая химия, природные сорбенты.
+7(911)919-11-04; mukhlenova@mail.ru

Хазиева
Регина Тагировна –
старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, аспирант.
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Область научных интересов – моделирование индуктивно-емкостных преобразователей.
8(917)365-14-42; khazievart@mail.ru

Хозиков
Ювеналий Федорович –
ст. научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук.
Область научных интересов – электромеханика, математическое моделирование электромагнитных, тепловых и механических проблем.
khozikov2010@yandex.ru

Чернышева
Ольга Борисовна –
старший преподаватель кафедры робототехники и электромеханики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – силовая электроника и электрический привод.
(812)494-70-34; +7(921)638-46-65;
olgchern@mail.ru

Чернышов
Александр Викторович –
кандидат технических наук, доцент кафедры ИУ-6 МФ (Компьютерные системы и сети).
Мытищинский филиал Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана.
Область научных интересов – измерительные и информационные системы.
+7(498 687-36-02; sch-ru@yandex.ru

Шабанов
Виталий Алексеевич –
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий (ЭЭП).
Уфимский государственный нефтяной технический университет (ГОУ ВО УГНТУ).
Область научных интересов – релейная защита, электропривод, электротехнические комплексы нефтегазовой отрасли.
+7(917)421-53-65;
ShabanovVA1@yandex.ru

Шавлиашвили
Дмитрий Гиевич –
студент факультета СПО.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматизации.
+7(812)494-70-34; kaf32@guap.ru

Шарафудинов
Тамиргазиз Талибуллович –
старший преподаватель кафедры управления в технических системах.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – виброакустическая диагностика сложных систем.
timsx@mail.ru

Шишлаков
Владислав Федорович –
доктор технических наук, профессор, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала.
+7(921)951-43-00; svfmail@yandex.ru

Шумаева
Елена Александровна –
кандидат наук по государственному управлению, доцент кафедры менеджмента и хозяйственного права.
Донецкий национальный технический университет.
Область научных интересов – оценка эффективности государственного управления, современные аспекты управления персоналом, моделирование процессов принятия управленческих решений, проблемы управления ресурсами в проектном менеджменте.
+38(062)301-03-41;
ea.shumaeva@gmail.com

Якимовский
Дмитрий Олегович –
кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отделения.
АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург.
Область научных интересов – прецизионное приборостроение.
(812)339-52-46; (812)376-03-15;
yakimovsky@yandex.ru

Яковлев
Роман Никитич –
студент, программист.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.
Область научных интересов – искусственный интеллект, робототехника, теория информационных систем.
+7(812)328-70-81; bomba.r44@mail.ru

Яцун
Сергей Федорович –
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой механики, мехатроники и робототехники.
Юго-Западный государственный университет.
Область научных интересов – мехатроника, робототехника, многозвенные системы, системы управления.
(4712)22-26-26; teormeh@inbox.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Белоногов О. Б. Полигармонический метод расчета частотных характеристик нелинейных динамических объектов 3

Бураков М. В. Иерархическое нечеткое управление 9

Бураков М. В. Решение алгебраических уравнений при помощи нейронной сети Хопфилда ... 14

Бураков М. В., Брунов М. С. Нечетко-модальное управление динамическим объектом с переменными параметрами 19

Бураков М. В., Шишлаков В. Ф. Моделирование солнечной батареи средствами MATLAB 24

Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Формирование образов на основе сенсорных данных роботов 30

Жукова Н. В., Быкова А. М. Исследование влияния интервала управления МРС-контроллера на время запаздывания в САУ темпом загрузки доменной шихты 35

Криволапчук И. Г., Решетникова Н. В. О моделировании ПЗУ В NI MULTISIM™ 39

Ларин П. С., Новиков М. О. Идентификация функционального состояния КЯЭУ посредством интеллектуальных программных систем 44

Ляшенко А. Л., Першин И. М. Модернизация системы управления водогрейным котлом 50

Пахунов А. С. Сравнительная характеристика методов совмещения изображений 54

Пахунов А. С. Обзор методов предварительной обработки изображений 58

Полилов Е. В. О местоположении гиперповерхностей скольжения релейно-модальных систем 61

Поминов С. Г., Ичетовкин Е. А. Методика оптимизации технических характеристик корабля комплексного снабжения на стадии исследовательского проектирования 70

Романчук В. А., Лукашенко В. В. Модель оптимального расписания планировщика ресурсов кластера нейрокомпьютеров для решения задачи управления гексаподом 78

Соколов Б. В., Палицын В. А., Назаров Д. И. Математическая модель и алгоритм совместного планирования измерительных и вычислительных операций при мониторинге обстановки в локальной акватории 81

Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Низкоскоростной исполнительный электропривод устройства поворотного солнечной батареи 88

Булгаков А. А. Применение методов имитации для решения нелинейной задачи квадратичного кумулятивного преобразования электроэнергетических процессов 95

Бурлака В. В., Гулаков С. В. Корректор коэффициента мощности с функцией фильтрации высших гармоник 99

Ворочаева Л. Ю., Савин С. И., Ворочаев А. В. Походки внутритрубного робота с гибкими связями для движения по прямолинейным и криволинейным участкам 105

Голубков В. А., Лукьяненко И. Н., Мельников С. Ю., Федоренко А. Г., Шарафудинов Т. Т. Выбор режимов ускоренных испытаний роторных систем 115

Голубков В. А., Шишлаков В. Ф., Федоренко А. Г., Шарафудинов Т. Т. Анализ влияния периодических ударных воздействий на параметры жесткости роторных систем 119

Горпинич А. В. Оценка показателей надежности конденсаторов звена постоянного тока преобразователей частоты 126

Гришанов С. А. Анализ математических моделей генератора для исследования асинхронных режимов 135

Гуков Д. В., Загуляев С. Д., Новиков С. А. Индуктивности рассеяния магнитного потока отдельных обмоток трансформатора 140

Долгих А. Г., Мартемьянов В. М., Бориков В. Н. Активный ленточный элемент моментного электродвигателя 144

Дробов А. В. Рациональные схемы электроснабжения промышленных и транспортных объектов 152

Дробов А. В. Повышение энергетической эффективности электрооборудования нетяговых железнодорожных потребителей 154

Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Управление активным однофазным выпрямителем тока . 157

Ефимов А. А. Асинхронные вентильные генераторы с активными преобразователями напряжения 163

Зайцев А. А., Положенцев Д. С., Якимовский Д. О. Результаты проектирования исполнительного следящего электромеханического рулевого привода для беспилотного летательного аппарата 170

Колесников В. В. Моделирование дефектов в обмотках силовых трехфазных трансформаторов на основе расширенного вектора парка тока в среде MATLAB/Simulink 175

Конесев С. Г., Кондратьев Э. Ю., Хазиева Р. Т., Конев А. А. Исследование эффективности работы индукторов 181

Косулин В. Д., Салова И. А. Аналитический расчет магнитных муфт в немагнитных конструкциях 186

Кручинина И. Ю., Хозиков Ю. Ф., Любимцев А. С., Пальцева В. В. Влияние особенностей конструкции массивного ротора асинхронной машины на его напряженно-деформированное состояние193

Мартынов А. А., Чернышева О. Б. К расчету коэффициентов искажения форм кривых сетевого напряжения и тока активного выпрямителя 200

Никулин О. В., Шабанов В. А. Моделирование системы электроснабжения буровой установки 209

Сасаров В. А., Слободяник А. С. Разработка импульсного источника питания для высокоинтенсивного разряда в нефти 215

Тимофеев С. С. Альтернативные источники энергии в судовых энергетических системах . 217

Трубенева С. Н., Болтнева А. В. Система электродвижения на судах..... 223

Денисов А. В., Яковлев Р. Н. Методы обеспечения устойчивости перемещения антропоморфного робота на основе обратного маятника 227

Смирнов П. А., Кузов М. Ю., Павлюк Н. А. Разработка модели манипулятора с изменяемой кинематической цепью 232

Соленый С. В., Шишлаков В. Ф., Соленая О. Я., Н. В. Артикульный, Д. Г. Шавлиашвили, Л. М. Ильин. Киберфизические системы в электроэнергетике 236

Турубанов М. А., Турубанова М. В., Трубенева С. Н. Универсальный робототехнический модуль многоканальной широтно-импульсной модуляции 242

Яцун С. Ф., Политов Е. Н., Казарян К. Г. Методика испытаний и экспериментальные исследования бионического робота-рыбы..... 246

Акопов В. С., Салова И. А. Исследование теплозащиты от замерзания воды в трубопроводах наружной части водопровода 253

Ганьшин Ю. А. Численный алгоритм идентификации магнитного поля шарообразного электромагнитного датчика 257

Герасимов А. В., Кирпичников А. П., Сабирова Ф. Р. Структура высокочастотного индукционного разряда и месторасположение максимумов его некоторых электрофизических параметров ... 260

Гуревич В. Э. Статистические характеристики доплеровского сдвига частоты 265

Дружинин В. Г., Кавтрев С. С., Рыбакова А. К., Белов М. Н. Вакуумметр комбинированный широкодиапазонный 269

Крылова Т. Е., Вигранеко Ю. Т., Кочерегин С. Б. Окисление предельного разветвленного альдегида C_{10} в двухфазной системе жидкость – жидкость 273

Ляшенко А. Л. Разработка системы контроля теплофизических параметров теплоносителя в технологических каналах атомного реактора 276

Малофеев Е. А. Возможность использования камеры сгорания вихревого противоточного типа в котельных установках..... 282

Николаев Ю. С. Термодинамика адсорбции паров воды на оксиде олова (IV) и антиобледенительные свойства покрытий на его основе.... 284

Турубанов М. А. Применение метода усредняющего дифференцирования для анализа качества изготовления фотошаблонов 288

Тюрюмина А. В., Секацкий В. С., Батрак А. П. Применение метода акустической эмиссии для диагностики силовых трансформаторов 293

Фомичева Т. И. Очистка растворов от неорганических анионов природными цеолитами..... 297

Андреева Д. А., Малинин А. М. Товарно-сервисная дуальность электрической энергетики в социально-экономической системе региона . 299

Армашова-Тельник Г. С. Процессно-целевой инструментарий в механизмах управления энергоинжиниринговой компанией как детерминанта роста эффективности ее функционирования 302

Зубкова А. Н. Риск-менеджмент в процессе функционирования электроэнергетических компаний..... 305

Семенова В. А. Электроэнергетика России: тенденции и направления развития 312

Акопов В. С., Евсеев Е. В., Полякова Т. Г. Учебно-исследовательский лабораторный комплекс «Система управления РЛС» 315

Буркина М. М. К вопросу о подготовке кадров по направлению «Мехатроника и робототехника» 319

Елтышева И. В., Елтышев Б. К. Реализация содержательной преемственности в системе непрерывного образования 322

Малашин А. А., Чернышов А. В., Виноградов Д. В. Экосистема малых роботов как основа построения учебного процесса в техническом вузе..... 329

Шумаева Е. А., Джура Г. С. Особенности формирования и развития единого государственного информационного пространства 333

Сведения об авторах 337

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ’17

Сборник докладов

10–14 апреля 2017 г.

Ответственный за выпуск:
д-р техн. наук, профессор *В. Ф. Шишлаков*

Редактор *В. С. Гончарова*
Компьютерная верстка *С. Б. Мацапуры*

Подписано к печати 24.10.17. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 41,8. Тираж 150 экз. Заказ № 442.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67