МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'18

Сборник докладов

16-20 апреля 2018 г.



3-13 Завалишинские чтения'18: сб. докл. / СПб.: ГУАП, 2018. 271 с.: ил.

ISBN 978-5-8088-1280-2

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 доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники

УДК 001 ББК 72 УДК 539.51-629.7

В. С. Акопов*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

И. А. Салова*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ВОДОПРОВОДНЫХ ТРУБ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В НИХ

В работе проведены анализ и сопоставление процессов теплообмена в стальных и полипропиленовых трубах при обогреве их извне с помощью саморегулирующегося кабеля. Получены динамические характеристики процесса нагревания воды от температуры +1°С для стальных и полипропиленовых водопроводных труб в условиях различных температур окружающей среды.

Ключевые слова: теплообмен, саморегулирующийся греющий кабель, стальные и полипропиленовые трубы, моделирование, метод конечных элементов.

V. S. Akopov*

PhD, Tech., Senior Researcher

I. A. Salova*

PhD, Tech., Associate Professor *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE WATER PIPES MATERIAL ON THE HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THEM

The paper analyzes and comparisons of the heat transfer processes in the steel and polypropylene pipes with heating from the outside by self-regulating heating cable. The dynamic characteristics of the water heating process from temperature +1°C for steel and polypropylene water pipes under different ambient temperatures are obtained.

Keywords: heat exchange, self-regulating heating cable, steel and polypropylene water pipes, simulation, finite element method.

В настоящее время строительная промышленность предлагает широкий ассортимент водопроводных труб, изготовленных из различных материалов: стали, меди, полипропилена, металлопластика, полихлорвинила, полиэтилена. Сравнение водопроводных труб удобно проследить по данным [1], приведенным в таблице.

Анализ таблицы показывает, что основными конкурентами в плане практического реального использования являются стальные и полипропиленовые трубы. С развитием современных технологий в строительстве традиционные стальные водопроводные системы постепенно вытесняются трубопроводами из полимерных материалов.

В связи с этим предлагаемая публикация посвящена анализу и сопоставлению процессов теплообмена в таких трубах при обогреве их извне с помощью саморегулирующегося кабеля, как

это показано в [2]. Оценка возможности термозащиты воды от замерзания в этих трубопроводах проводится путем моделирования тепловых процессов в трубах наружной части водопроводной системы. Для моделирования выбран метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ELCUT [3].

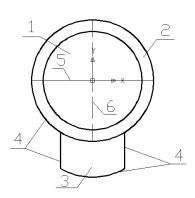
Исследования процессов изменения температуры выполнялись для стальных и полипропиленовых водопроводных труб сечением 20 мм. На рис. 1 представлена геометрическая модель, на которой приняты следующие обозначения: 1 — вода; 2 — труба; 3 — саморегулирующийся греющий кабель VC-F [2, 3]; 4 — контур задания граничных условий; 5, 6 — контуры для определения температуры по соответствующим сечениям. Для моделирования в ELCUT необходимо задать свойства кабеля, трубы и воды, а также

Таблица

Сравнение различных видов труб

Основные качественные	Металлические			Пластиковые		
характеристики	Сталь	Медь	Нержавею-	Полипро-	Металло-	Полиэти-
			щая сталь	пилен	пластик	лен ПНД
Качество водопроводной системы	по 10-балльной шкале					
Механические свойства материала труб						
Прочность труб	10	10	10	10	6	3
Сохранение формы при деформации	6	4	8	8	2	2
Тепловое удлинение	10	8	10	2	8	4
Химические свойства материала труб						
Устойчивость к химической коррозии	6	6	10	10	10	10
Устойчивость к электрохимической коррозии	4	6	10	10	10	10
Устойчивость к УФ-излучению	10	9	10	5	7	4
Защищенность от пропуска кислорода	10	10	10	6	6	2
Характеристики водопроводной системы						
Противодействие накоплению отложений	2	8	10	10	10	10
Гидравлическое сопротивление	4	10	8	10	10	6
Надежность соединений	10	10	6	10	6	2
Средний показатель качества	7,2	8,1	9,2	8,1	7,5	5,3
Ценовая категория	по 10-балльной шкале					
Стоимость материала	6	7	10	2	3	2
Сложность монтажа	10	7	10	5	6	6
Средний показатель ценовой категории	8	7	10	3,5	4,5	4
Отношение цена/качество	чем меньше, тем лучше					
	1,1	0,9	1,1	0,4	0,6	0,8

на границе 4 задать температуру окружающей среды $T_{\rm H}$ и коэффициент конвекции α . Для VC-F кабеля задается удельная плотность ρ =2163 кг/ ${\rm m}^3$, удельная теплопроводность λ =0,25Bт/(${\rm m}^{\cdot}{\rm K}$), теплоемкость C_p =750 Дж/(кг· ${\rm K}$), а также зависимость линейной мощности P (на 1 м длины) кабеля от температуры [2]. Для стальных (полипропиленовых) труб приняты следующие свойства материала: удельная плотность ρ =7866 кг/ ${\rm m}^3$ (ρ =900 кг/ ${\rm m}^3$), удельная теплопроводность

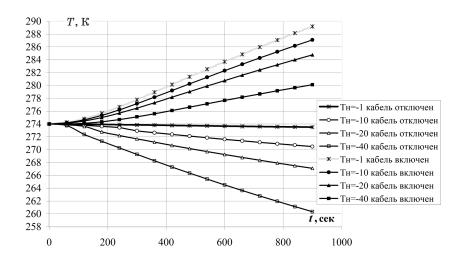


Puc. 1. Геометрическая модель трубы с греющим кабелем

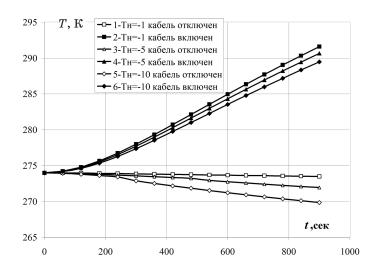
 $\lambda=48 {\rm BT/(m\cdot K)}$ ($\lambda=0,22 {\rm BT/(m\cdot K)}$), теплоемкость $C_p=610~{\rm Дж/(kr\cdot K)}$ ($C_p=1930~{\rm Дж/(kr\cdot K)}$). Для воды перечисленные свойства зависят от текущего значения температуры. Эти зависимости приведены в [2]. В модели пренебрегаем тепловыми потерями за счет лучистой теплоотдачи, которая зависит от температуры воздуха и температуры поверхности трубы, а также от степени черноты поверхности трубы.

Полученные в процессе исследований динамические характеристики процесса нагревания воды от температуры $+1^{\circ}$ С для стальных и полипропиленовых водопроводных труб в условиях различных температур окружающей среды показаны ниже на рис. 2-7. Для полипропиленовой трубы приведенные графики ограничены нижним значением температуры $T=-10^{\circ}$ С, так как это соответствует рекомендуемым условиям их эксплуатации.

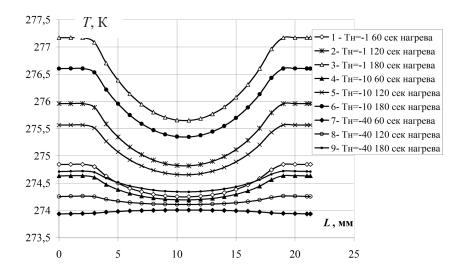
На рис. 4 и 5 показано распределение температуры по поперечному сечению водопроводной трубы с водой (по контуру 5, рис. 1) в разные моменты времени при разных значениях температуры окружающей среды (кабель включен). Рис. 4 соответствует стальной трубе, а рис. 5 — полипропиленовой. На рис. 6 и 7 показано распределение температуры по поперечному сечению водопроводной трубы с водой (по контуру 6, рис. 1) в разные моменты времени при разных



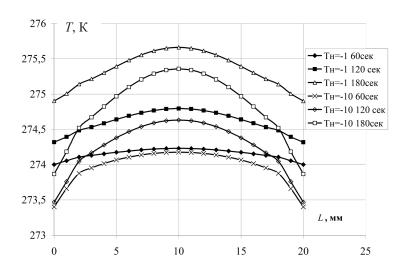
 $Puc.\,2.\,$ Динамика изменения температуры воды в центре стального трубопровода при различных температурах $T_{_{\rm H}}$ наружной среды с включенным греющим кабелем и без него



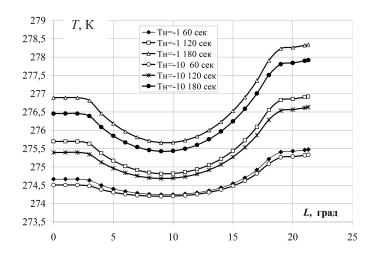
Puc. 3. Динамика изменения температуры воды в центре полипропиленового трубопровода при различных температурах $T_{\scriptscriptstyle H}$ наружной среды



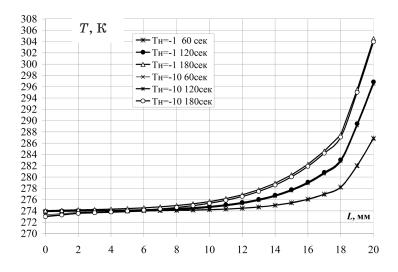
 $Puc.\ 4.\ Pacnpedenetue\ memnepamypы\ для\ cmальной\ mpyбы\ вдоль\ контура\ 5\ в\ зависимости\ om\ T_{_{H}}\ u\ времени\ нагрева$



Puc. 5. Распределение температуры для полипропиленовой трубы вдоль контура 5 в зависимости от $T_{_{\rm H}}$ и времени нагрева



 $Puc.\,6.\,Pac$ пределение температуры для стальной трубы вдоль контура 6 (сверху вниз) в зависимости от $T_{_{\rm H}}$ и времени нагрева



 $Puc.\ 7.\ Pac пределение\ mem пературы\ в\ noлипропиленовой\ mpyбe\ вдоль\ контура\ 6\ (сверху\ вниз)\ в\ зависимости\ om\ <math>T_{_H}$ и времени нагрева

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

значениях температуры окружающей среды (кабель включен). Рис. 6 соответствует стальной трубе, а рис. 7 – полипропиленовой.

Анализ материалов исследований, приведенных на рис. 2-7, позволяет сделать следующие выводы:

- 1. Температурный градиент при обогреве полипропиленовой трубы с водой в ее центре несколько выше, чем у стальной трубы: например, при температуре окружающей среды -1° С при вычислении на интервале 600 секунд скорости нагревания составляют 0,0183 град/с для полипропиленовой трубы и 0,0166 град/с для стальной трубы.
- 2. Анализ распределения температур в горизонтальном сечении, проходящем через центр труб, показывает существенно отличающийся их характер распределения: в стальной трубе наблюдается минимум температуры в центре трубы, а в полипропиленовой наоборот максимум. Этот эффект обусловлен различной теплопроводностью материалов стенок трубопроводов, причем теплопроводность стали выше, чем у воды, поэтому температура стенки трубы выше, чем воды в трубе, а теплопроводность полипропилена ниже, чем воды в трубе, поэтому температура стенки трубы ниже, чем воды в трубе.
- 3. Различная теплопроводность материалов стенок трубопроводов сказалась и на распределе-

нии температур в вертикальном сечении, проходящем через центр труб: верхние и центральные точки сечения лучше прогреваются у стальной трубы, однако нижние точки сечения гораздо лучше прогреваются в полипропиленовой трубе.

4. Как стальная, так и полипропиленовая трубы с достаточной и в среднем с одинаковой эффективностью могут быть использованы в системах тепловой защиты водопроводной воды от замерзания.

- 1. URL: http://stera.su>info/article... vodoprovodnykh trub.html
- 2. Аколов В. С., Салова И. А. Моделирование противообледенительной системы методом конечных элементов // Завалишинские чтения 16. СПб.: ГУАП, 2016. С. 16–20.
- 3. ELCUT v.6.0. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив TOP, 2014.
- 4. URL: http://alfaopt.alloy.ru/product/sistema-videonablyudeniya/hlle2cf-camoreguliruyushayasya-nagrevatelnaya-lent-9818682/.

УДК 621.372

В. С. Акопов*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Т. Г. Полякова*

кандидат технических наук, доцент

Е. А. Ичетовкин*

студент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Показано, что для оценки сигнала с низким процентом информационной составляющей и высокой зашумленностью можно использовать фильтр на основе модифицированного цифрового пикового детектора. Для реализации алгоритма работы фильтра предлагается микроконтроллер. Предложена методика обработки такого сигнала и устройство для оценки параметров сигнала и его распознавания.

Ключевые слова: цифровой фильтр, методика фильтрации, устройство фильтрации.

V. S. Akopov*

PhD, Tech., Senior Researcher

T. G. Polyakova*

PhD, Tech., Associate Professor

E. A. Ichetovkin*

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

HIGH SENSITIVITY DIGITAL FILTER

High sensitivity digital filter shows that for the measurement of the signal with low information content and high noisiness you can use a filter on the basis of modified digital peak detector. To implement a filter algorithm is proposed for the microcontroller. The technique of signal processing and signal parameters estimation and its recognition.

Keywords: digital filter, filtration, filtration device technique.

При измерении сигналов, где информационная составляющая составляет менее 5% от уровня основного сигнала, возникают значительные трудности его распознавания.

Особенно это важно, если речь идет о нерегулярном сигнале с большим разбросом частот.

Для обработки такого сигнала в реальном времени в работе предлагается использовать цифровые пиковые детекторы, которые отличаются механизмом самосбрасывания, а также микроконтроллер Arduino [1].

Для проверки пригодности предлагаемой методики обработки сигнала и пригодности устройства в виде микроконтроллера Arduino с помощью пакета программ MATLAB был генерирован тестовый сигнал, изображенный на рис. 1.

Данный сигнал имеет частоту примерно 1 кГц, номинальное значение по уровню 1,32 В, процент информационной составляющей всего 4%, в то время как шум на некоторых участках превышает это значение и достигает 7% от номинального значения сигнала. Об актуальности качественной обработки подобных сигналов отмечалось в работе, посвященной косвенному методу измерения скорости вращения коллекторных двигателей [2].

Для обработки данного сигнала выберем следующие параметры микроконтроллера Arduino: шаг квантования по времени T_0 =0,0001 с, аналоговый вход имеет 10-битное расширение.

В качестве фильтра рассмотрен цифровой фильтр высокой чувствительности. В основе

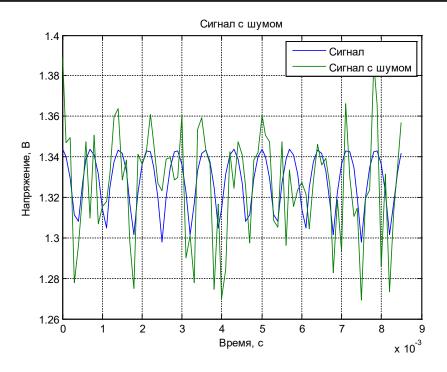


Рис. 1. Генерированный тестовый сигнал

фильтра заложен принцип поиска пиков максимума и минимума. Однако работа данного цифрового пикового детектора отличается от классического самосбрасывающимся механизмом, который при одновременной работе в паре модулей поиска минимума и максимума дает хорошие результаты, представленные на рис. 3.

Для успешной работы изначально необходимо четко задать окно поиска, которое может быть плавающим в зависимости от мощности сигнала, а также может регулироваться в зависимости и от другого параметра.

Таким образом, окно поиска имеет адаптивный характер, что позволяет фильтру легко ра-

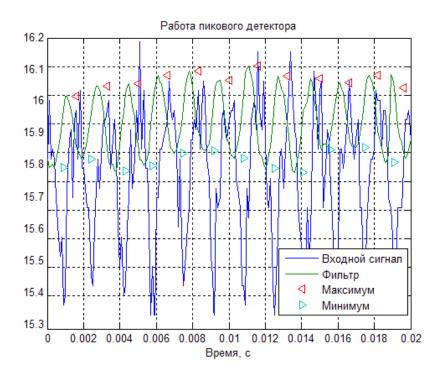


Рис. 2. Результат работы блока пиковых детекторов

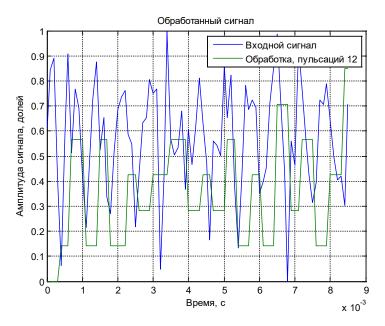


Рис. 3. Аппроксимирующий сигнал

ботать в большом диапазоне частот сигнала, его номинальных значений и с большим количеством различных датчиков сигналов [3].

В ходе поиска (рис. 2) фильтр, к примеру, сначала пытается найти максимум, сканируя точку за точкой. Как только координаты точек начинают уходить в сторону меньшую, чем было уже найдено, через какое-то время (в зависимости от размера окна поиска) он переключается на поиск минимума, запоминая последнее максимальное значение. При поиске минимума фильтр работает аналогичным образом. Этот предлагаемый в данной работе алгоритм пиковых детекторов называется самосбрасывающимся механизмом пиковых детекторов [3].

Во время поиска шумы могут создавать ложные срабатывания, сдвигая точку минимума и максимума на некоторое количество точек. Обычно данная погрешность уменьшается с увеличением количества точек, составляющих полезный сигнал.

После того как были обнаружены все точки перехода, по этим точкам можно смоделировать аппроксимирующий сигнал, например сигнал прямоугольной формы, который представлен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, нет прямой связи между амплитудами сигналов — обрабатываемый сигнал и аппроксимированный сигнал, это связано с несколькими факторами: высокий процент шума (около 15% при информационной составляющей 3%), мало точек для обработки, особенности алгоритма обработки.

Как было описано ранее, механизм фильтрации ставит задачу поиска локальных точек экстремума, и уже по этим точкам строится восстановленный сигнал, функцию восстановления можно задать любую, на рис. 2 была представлена линейная.

Если мы знаем, что сигнал необходим определенной амплитуды, это можно сделать как в [4], при этом точки экстремума можно расположить в одну линию, что сделать проще, чем найти их.

Исходя из вышеописанного, можно считать, что при правильном выборе шага квантования микроконтроллера Arduino можно обеспечить успешную работу для фильтрации сигнала с заданными характеристиками.

Функциональная схема цифрового фильтра высокой чувствительности, который может быть использован для косвенного измерения скорости вращения коллекторных двигателей, представлена на рис. 4.

На рис. 4 использованы следующие обозначения: Ис - измеритель сигнала; Ф - фильтр для снижения шума; ПДтах - пиковый детектор с запоминанием максимума, необходим для поиска локального максимума сигнала, связан с ПДmin, поскольку ищет максимум только тогда, когда найден минимум (при нахождении максимума выдает сигнал установки на триггер); ПДmin - пиковый детектор с запоминанием минимума, необходим для поиска локального минимума сигнала, связан с ПДтах, поскольку ищет минимум только тогда, когда найден максимум (при нахождении минимума выдает сигнал установки на триггер); T1,2(RS) - RS триггеры; AND - логическое И; СЧ - счетчик импульсов, поступающих от AND; Fэ - генератор эталонной (заданной) частоты; Иf — измеритель частоты, сравнивает частоту сигналов, поступающих на счетчик с эталонной частотой, тем самым определяя частоту; Иф – измеритель угла.

Для реализации цифрового фильтра высокой чувствительности предлагается использовать контроллер Arduino UNO – рис. 5, параметры контроллера представлены в таблице.

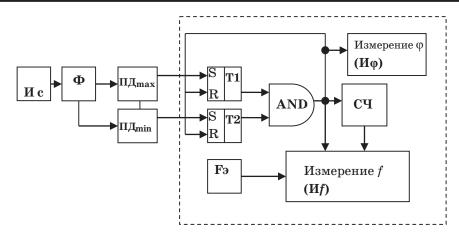


Рис. 4. Цифровой фильтр высокой чувствительности



Puc. 5. Микроконтроллер Arduino UNO

Параметры микроконтроллера Arduino UNO:

параметры микроконтроллера Arduno UNO:				
Микропроцессор	ATmega328			
Рабочее напряжение	5 B			
Цифровые входы/выходы	14			
Аналоговые входы	6			
Частота обновления аналого-	10 кГц			
вых входов				
Размерность аналоговых вхо-	10 бит			
дов				
Постоянный ток через вход/	40 мА			
выход				
Постоянный ток для вывода	50 мА			
3.3 B				
Флеш-память	32 Кб			
	(ATmega328), из			
	которых 0,5 Кб			
	используются для			
	загрузчика			
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)			
EEPROM	1 Кб (ATmega328)			
Тактовая частота	16 МГц			

Для того чтоб контроллер мог выполнять возложенные на него функции, необходимо, чтобы загруженный алгоритм вычисления выполнялся с должной скоростью, что требует выполнения операции оптимизации.

Контроллер после выполнения расчетов пробрасывает посредством USB-порта информацию на ЭВМ, где в специальном приложении можно наблюдать результат обработки.

Язык программирования ARDUINO основан на языке программирования высокого уровня С [1]. Программирование микроконтроллера осуществляется посредством бесплатного программного обеспечения Arduino IDE.

Таким образом, выполнен анализ возможности использования микроконтроллера Arduino Uno для реализации цифрового фильтра высокой чувствительности.

Предложена функциональная схема устройства распознавания сигнала с информационной составляющей менее 5% и высоким процентом шума.

Разработано устройство, реализующее функцию цифрового фильтра высокой чувствительности на базе микроконтроллера Arduino UNO.

- 1. *Петин В. А.* Проекты с использованием контроллера Arduino. Спб.: БХВ-Петербург, 2016. 448 с.
- 2. Аколов В. С., Ичетовкин Е. А. Косвенный метод измерения скорости вращения коллекторных электродвигателей // Завалишинские чтения' 17. СПб.: ГУАП. 2017.
- 3. Датчики: справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой и т. д. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
- 4. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. Т2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. Спб.: Питер, 2009. 490 с.

УДК: 681.5.01

О. И. Борисов*

кандидат технических наук, ассистент

Д. А. Галкина*

студентка 3-го курса

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий. механики и оптики

ТРАЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОЛНОВЫМИ ГЛАЙДЕРАМИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В НЕИЗВЕСТНОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Рассмотрена организация траекторного управления группой морских роботизированных объектов на примере волновых глайдеров-ретрансляторов при формировании системы управления подводными объектами в условиях неопределенной динамики и внешних возмущений.

Ключевые слова: траекторное управление, групповое управление, система управления.

O. I. Borisov*

PhD, Assistant Lecturer

D. A. Galkina*

3d year Student

*St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

TRAJECTORY CONTROL OF WAVE GLIDERS IN FORMING THE CONTROL SYSTEM FOR UNDERWATER OBJECTS IN THE UNKNOWN ENVIRONMENT

The organization of the trajectory control of a group of marine robotic objects by the example of wave glider retransmitters in the formation of a control system for underwater objects under conditions of uncertain dynamics and external disturbances is considered.

Keywords: trajectory control, group control, control system.

В соответствии с Морской доктриной Российской Федерации, в интересах сохранения и дальнейшего расширения минерально-сырьевой базы, создания стратегического резерва запасов, обеспечения освоения минеральных и энергетических ресурсов Мирового океана производится разработка новых технических средств и технологий изучения, освоения, добычи и транспортировки минеральных и топливно-энергетических ресурсов Мирового океана, интенсификация работ в области специального судостроения, включая строительство морских платформ различного класса [1]. К работам по данному направлению привлекаются крупнейшие конструкторские бюро, в частности Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», осуществляющее при поддержке Фонда перспективных исследований разработку пяти подводных автономных комплексов добычи полезных ископаемых с применением подводных буровых и транспортно-монтажных комплексов, морских робототехнических комплексов различного назначения [2].

Также особое внимание уделяется предотвращению антропогенных и техногенных катастроф на море, в частности путем осуществления строгого надзора за строительством и эксплуатацией морских гидротехнических сооружений [1]. Все это достигается применением морских робототехнических комплексов, позволяющих проводить съемку рельефа дна, измерение океанологических величин, освещение подводной и донной обстановки, обследование подводных гидротехнических сооружений и инфраструктуры, обеспечение дноуглубительных работ, прокладку кабелей, инспектирование подводных трубопроводов, поисковые и аварийно-спасательные работы (рис. 1). Поскольку при проведении дан-

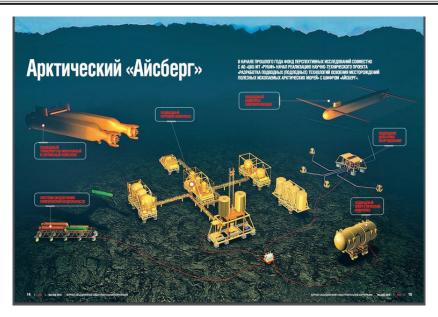


Рис. 1. Организация подводного роботизированного комплекса «Айсберг»

ных мероприятий групповое применение робототехнических комплексов различного назначения позволит существенно сократить время выполнения задач по предназначению, обследовать большие пространства Мирового океана [3], то разработка способов реализации группового управления робототехническими комплексами, разработка функциональных моделей, обоснование форм и способов их применения являются актуальными и важными задачами.

С конца 2011 года Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ) проводит комплексные исследования в целях создания глобальной информационно-измерительной системы [4]. Данная система позволит производить управление подводными робототехническими комплексами различного назначения, в том числе и элементами подводного роботизированного комплекса «Айсберг». Необходимость использования информационно-измерительной системы для управления подводными объектами обусловлена существованием ряда ограничений информационного обмена под водой:

- 1. Основной канал обмена данными под водой – гидроакустический.
- 2. Скорость информационного обмена находится в прямой зависимости от используемой полосы частот.
- 3. Увеличение скорости передачи требует увеличения полосы рабочих частот и предполагает повышение средней частотой сигнала, однако в силу природы распространения звуковых волн с увеличением частоты используемых сигналов увеличивается затухание, что ведет к снижению доступной дальности информационного обмена.

В результате дальность скоростного обмена данными по гидроакустическому каналу не превышает 4-6 км [5].

Скорость передачи данных составляет в среднем $6-10~\rm kбит/c$, что явно недостаточно как для оперативного управления подводными объектами, в том числе автономными необитаемыми подводными аппаратами, так и для передачи фото- и видеоинформации.

В научно-исследовательском центре Санкт-Петербургского государственного морского технического университета было предложено использование групп волновых глайдеров в качестве ретрансляторов информации с погруженных объектов посредством передачи информации по воздуху. Возможная модель использования группы волновых глайдеров в качестве ретрансляторов сигналов управления приведена на рис. 2, где используются следующие обозначения [5]:

- волновые глайдеры группы;
- r радиус зоны обслуживания радиогидроакустическим ретранслятором, установленным на одном глайдере;
- R радиус зоны обслуживания радиогидроакустических ретрансляторов, установленных на семи глайдерах одной группы;
- D дальность прямой радиосвязи между ретрансляторами на «гладкой» поверхности.

Однако в предложенной модели отсутствует описание организации управления самими волновыми глайдерами. Исходя из предложенной модели, волновые глайдеры, находящиеся в условиях неопределенной динамики и внешних возмущений, окажутся на расстоянии, не позволяющем обеспечить постоянный перекрыш их полей в районе использования автономных необитаемых подводных аппаратов — ретрансляторы будут находиться в постоянном движении под влиянием ветра, зыби, волнения и других явлений. Решить данную проблему без создания собственной системы управления невозможно.

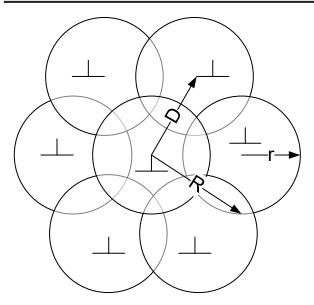


Рис. 2. Возможная модель использования группы волновых глайдеров

Чтобы система ретрансляторов позволила обеспечить эффективное использование автономных необитаемых подводных аппаратов, в том числе и групповое, необходимо организовать поддержание непрерывного покрытия района применения автономных необитаемых подводных аппаратов ретрансляторами. Таким образом возникает противоречие между необходимостью эффективного выполнения задач системы волновых глайдеров-ретрансляторов и поддержанием устойчивости данной системы.

Основным требованием, предъявляемым к предложенной системе управления, являются: запас устойчивости, благодаря которому система продолжит исправно работать, если глайдер уйдет на некоторое расстояние, при этом сохранив достаточный перекрыш полей системы; статическая и динамическая точности, обеспечивающие постоянные перекрыш и местоположение глайдеров на заданном расстоянии друг от друга. Кроме того, система должна быть робастной, то есть малочувствительной к сторонним воздействиям на ретранслятор, таким как волнение, зыби и т. д.

Алгоритм работы предложенной системы управления следующий: при передаче сигнала между глайдерами в волне кодируются такие дополнительные параметры, как номер аппарата, время отправки сигнала и координаты аппарата. Поскольку каждый ретранслятор строит вектора, его программное обеспечение следит за

расстоянием относительно друг друга, после чего фиксирует два-три вектора наименьшей длины. Затем, если наблюдается увеличение длины векторов ближайших ретрансляторов, система управления подаст команду двигателям глайдеров с целью сокращения расстояния между ними, соответственно, и длины векторов. Кроме того, чтобы исключить ошибку, при которой ретрансляторы будут пытаться безостановочно сократить расстояние между собой, требуется ввести диапазон расстояний, в пределах которого система управления не будет подавать сигналы двигателям.

Таким образом, в данной статье проведен анализ существующих направлений реализации Морской доктрины Российской Федерации ведущими научными организациями в области морской техники, определены проблемы организации управления подводными роботизированными комплексами, проведен анализ предложенных решений, выявлена проблема организации управления волновыми глайдерами при формировании системы управления подводными объектами, предложена концепция траекторного управления волновыми глайдерами в неизвестной окружающей среде.

- 1. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года.
- 2. URL: http://ckb-rubin.ru/press_centr/novosti/novost/news/detail/News/podvodnyi_robotizirovannyi kompleks aisberg preds.
- 3. Галкин И.А. Организация навигационного обеспечения морских робототехнических комплексов военного назначения в оперативно-важных районах Мирового океана // Экстремальная робототехника: сб. тезисов междунар. науч.-тех. конф. СПб.: Гангут, ЦНИИ робототехники и кибернетики. 2017. С. 183–188.
- 4. Кожемякин И. В. Разработка подводных и волновых глайдеров элементов морской глобальной информационно-измерительной системы // Информационный морской журнал «Корабел». № 2 (28). С. 114–116.
- 5. Кожемякин И. В., Потехин Ю. П., Рождественский К. В., Рыжов В. А. Волновой глайдер как элемент морской глобальной информационно-измерительной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. № 1. 2015. С. 58–72.

УДК 681.5

М. В. Бураков

кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Рассматривается применение нейронной сети Хопфилда для параметрической идентификации линейного динамического объекта. Описываются принципы выбора структуры нейронной сети и формирования весовых коэффициентов межнейронных связей. Приводятся результаты моделирования в MatLab, подтверждающие удовлетворительное качество идентификации.

Ключевые слова: идентификация, нейронная сеть Хопфилда, моделирование.

M. V. Burakov

PhD, Tech., Associate Professor

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE USING OF HOPFIELD NEURAL NETWORK FOR IDENTIFICATION OF A DYNAMIC PLANT

The application of the Hopfield neural network for the parametric identification of a linear dynamic plant is considered. The principles of the choice of the structure of the neural network and the formation of the weight coefficients of the inter-neural connections are described. Results of modeling in MatLab, confirming the satisfactory quality of identification are presented.

Keywords: identification, Hopfield neural network, modeling.

Задача идентификации заключается в определении структуры и параметров математической модели объекта по экспериментальным наблюдениям [1, 2].

Структурная идентификация подразумевает выбор общего вида (класса) модели объекта. Например, это может быть выбор порядка передаточной функции (ПФ) объекта. На этапе параметрической идентификации требуется выбрать такие параметры ПФ, при которых ее выход наиболее соответствует выходу объекта.

Параметрическая идентификация может выполняться в режиме offline или многократно в реальном времени (online). Вариант online используется в адаптивных системах управления.

На вход исследуемого объекта подается некоторое тестовое воздействие u(t), для линейного объекта это может быть единичный скачок. Выходной сигнал y(t) представляет собой реакцию на тестовое воздействие u(t), которая называется кривой разгона.

Линейный динамический объект может быть описан дискретной $\Pi\Phi$ вида

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}}.$$
(1)

Таким образом, задача идентификации сводится к поиску неизвестных коэффициентов b_0 , b_1 , ... b_m и a_1 , a_2 , ... a_n .

На практике для решения задачи параметрической идентификации часто используется метод наименьших квадратов и его модификации [2, 3]. Однако в последние годы все более широко используются методы идентификации на базе искусственных нейронных сетей (НС) [4–7].

Использование НС для идентификации позволяет отказаться от аналитических расчетов в пользу алгоритмов обучения с использованием экспериментальных данных. Для линейных объектов наиболее разработаны методы идентификации на базе НС прямого распространения [6-9]. Менее изучены алгоритмы идентификации на базе динамических НС, в частности нейронной сети Хопфилда [10, 11]. Нейронные сети Хопфилда - это однослойные рекуррентные динамические сети, то есть сети с одним слоем нейронов, где выходы и каждого из них подаются обратно на вход. При этом каждому входу соответствует своя весовая функция W (рис. 1, где ИН – искусственный нейрон, V – смещение нейрона, z^{-1} – задержка на один такт).

В каждом ИН выполняется операция суммирования и вычисления активационной функ-

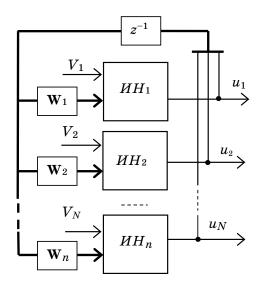


Рис. 1. Структура нейронной сети Хопфилда

ции, в качестве которой обычно используется гиперболический тангенс.

С НС Хопфилда при решении конкретной задачи обычно ассоциируется некоторая энергетическая функция, которая уменьшается во время переходного процесса. Принцип минимизации энергии позволяет решать различные оптимизационные проблемы, например искать решение систем линейных и нелинейных уравнений [12].

В данной работе описываются принципы использования динамической НС в задаче идентификации линейного динамического объекта.

Нейронная сеть Хопфилда в задаче идентификации

Рассмотрим для простоты описания динамический объект 2-го порядка, для которого из (1) получается уравнение

$$Y(z)\Big(1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}\Big)=U(z)\Big(b_0+b_1z^{-1}\Big). \quad (2)$$

Преобразуем (2) в разностное уравнение, которое служит моделью линейного объекта:

$$y(k) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2)$$
. (3)

Для идентификации надо рассмотреть несколько последовательных моментов времени, в которых рассматривается (3). Количество уравнений должно быть больше или равно количеству параметров модели объекта, например:

$$\begin{cases} b_1 u(1) + b_2 u(2) + y(2)a_1 + y(3)a_2 = y(1), \\ b_1 u(2) + b_2 u(3) + y(3)a_1 + y(4)a_2 = y(2), \\ b_1 u(3) + b_2 u(4) + y(4)a_1 + y(5)a_2 = y(3), \\ b_1 u(4) + b_2 u(5) + y(5)a_1 + y(6)a_2 = y(4), \\ b_1 u(5) + b_2 u(6) + y(6)a_1 + y(7)a_2 = y(5). \end{cases}$$
(4)

С системой (4) может быть связана энергетическая функция, описывающая ошибку моделирования:

$$E = \sum_{i=1}^{5} {b_1 u(i) + b_2 u(i+1) - y(i+2)a_1 - \choose -y(i+1)a_2 - y(i)}^2.$$
 (5)

Минимизация (5) означает выбор таких значений $b_1,\,b_2$ и $a_1,\,a_2,\,$ при которых динамика модели наиболее близка динамике объекта.

Очевидно, что E > 0 во всех точках, кроме точки равновесия, где она обнуляется.

Динамика НС должна быть реализована таким образом, чтобы функция (5) стала функцией Ляпунова, то есть имела отрицательную производную.

$$\frac{dE(a_1, a_2, b_1, b_2)}{dt} = \frac{\partial E(a_1)}{\partial a_1} \frac{da_1}{dt} + \frac{\partial E(a_2)}{\partial a_2} \frac{da_2}{dt} + \frac{\partial E(a_1)}{\partial b_1} \frac{db_1}{dt} + \frac{\partial E(b_2)}{\partial b_2} \frac{db_2}{dt}.$$
(6)

Количество нейронов НС Хопфилда должно соответствовать количеству неизвестных параметров, то есть равно 4.

Пусть u_i — выход i-го нейрона (i=1..4). Тогда для того чтобы E была функцией Ляпунова, необходимо выполнение условий [12]:

$$\begin{cases}
\frac{du_1}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial a_1}; \\
\frac{du_2}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial a_2}; \\
\frac{du_3}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial b_1}; \\
\frac{du_4}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial b_2}.
\end{cases} (7)$$

После подстановки (6) в (7) и выполнения преобразований получаем следующий набор весов W и смещений V динамической HC:

$$W_1 = \begin{bmatrix} u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 & u_1u_2 + u_2u_3 + u_3u_4 + u_4u_5 + u_5u_6 \\ u_1u_2 + u_2u_3 + u_3u_4 + u_4u_5 + u_5u_6 & u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 \\ -y_3u_1 - y_4u_2 - y_5u_3 - y_6u_4 - y_7u_5 & -y_3u_2 - y_4u_3 - y_5u_4 - y_6u_5 - y_7u_6 \\ -y_2u_1 - y_3u_2 - y_4u_3 - y_5u_4 - y_6u_5 & -y_2u_2 - y_3u_3 - y_4u_4 - y_5u_5 - y_6u_6 \end{bmatrix};$$

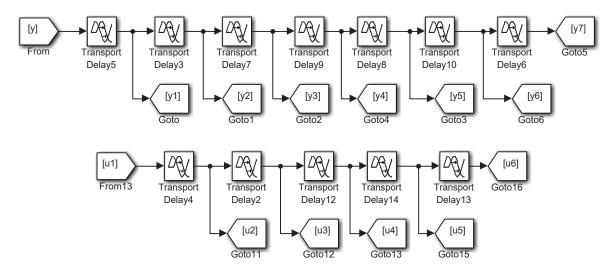
$$W_{2} = \begin{bmatrix} -u_{1}y_{3} - u_{2}y_{4} - u_{3}y_{5} - u_{4}y_{6} - u_{5}y_{7} & -u_{1}y_{2} - u_{2}y_{3} - u_{3}y_{4} - u_{4}y_{5} - u_{5}y_{6} \\ -u_{2}y_{3} - u_{3}y_{4} - u_{4}y_{5} - u_{5}y_{6} - u_{6}y_{7} & -u_{2}y_{2} - u_{3}y_{3} - u_{4}y_{4} - u_{5}y_{5} - u_{6}y_{6} \\ y_{3}^{2} + y_{4}^{2} + y_{5}^{2} + y_{6}^{2} + y_{7}^{2} & y_{2}y_{3} + y_{3}y_{4} + y_{4}y_{5} + y_{5}y_{6} + y_{6}y_{7} \\ y_{2}y_{3} + y_{3}y_{4} + y_{4}y_{5} + y_{5}y_{6} + y_{6}y_{7} & y_{2}^{2} + y_{3}^{2} + y_{4}^{2} + y_{5}^{2} + y_{6}^{2} \end{bmatrix}; W = [W_{1}; W_{2}].$$

$$V = \begin{bmatrix} -u_{1}y_{1} - u_{2}y_{2} - u_{3}y_{3} - u_{4}y_{4} - u_{5}y_{5} \\ -u_{2}y_{1} - u_{3}y_{2} - u_{4}y_{3} - u_{5}y_{4} - u_{6}y_{5} \\ y_{1}y_{3} + y_{2}y_{4} + y_{3}y_{5} + y_{4}y_{6} + y_{5}y_{7} \\ y_{1}y_{2} + y_{2}y_{3} + y_{3}y_{4} + y_{4}y_{5} + y_{5}y_{6} \end{bmatrix}.$$

В соответствии с (4) на вход НС Хопфилда подаются задержанные значения входов и выходов (рис. 2). Активационная функция является линейной.

Используя эти значения, на каждой итерации рассчитываются матрицы весов W и смещений V.

На рис. 3 показан фрагмент НС Хопфилда.



Puc. 2. Реализация блока задержек в MATLAB

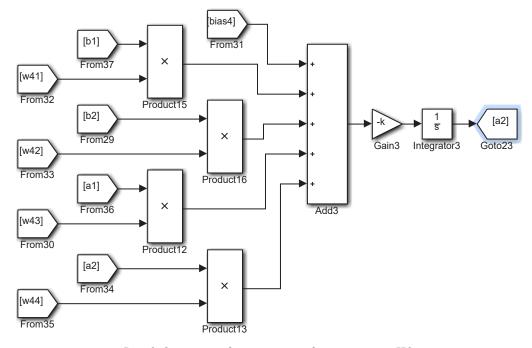


Рис. 3. Описание одного нейрона динамической НС

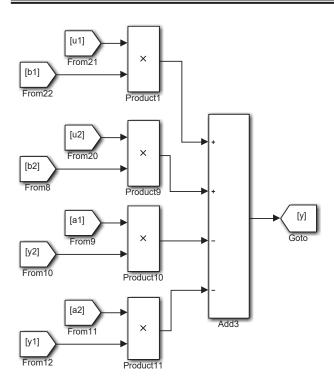


Рис. 4. Модель линейного объекта 2-го порядка

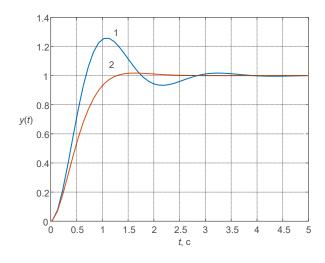
На рис. 4. приведена конечно-разностная модель линейного динамического объекта.

Таким образом, динамическая НС непрерывно обрабатывает информацию с входа и выхода объекта, формируя оценки параметров модели (3). При неизменных параметрах объекта оценки также не изменяются, иначе в НС возникает переходный процесс.

Пример моделирования

Рассмотрим систему, в которой происходит переключение между двумя передаточными функциями (П Φ), описывающими объект управления:

$$W_1 = \frac{1}{0,1s^2 + 0,25s + 1}; \ W_2 = \frac{1}{0,1s^2 + 0,5s + 1}.$$



 $Puc.\,5.\, Переходные процессы \ для различных описаний объекта: <math>1-W_1;\, 2-W_2$

Этим $\Pi\Phi$ соответствуют переходные процессы, показанные на рис. 5.

На рис. 6 показана схема проведения вычислительного эксперимента, на 25 секунде происходит переключение описания объекта управления.

На рис. 7 приведены переходные процессы в системе с идентификатором.

Как показывает рис. 7, переходные процессы на выходе объекта и модели достаточно близки, то есть качество идентификации удовлетворительное.

На рис. 8 показано изменение оценок коэффициентов модели.

Рассмотренный вариант использования динамической НС для идентификации линейного объекта является альтернативой классическим методам идентификации. В отличие от идентификации на базе НС прямого распространения, где модель обучается по накопленной информации offline, здесь происходит непрерывная оценка параметров, что может быть важно при организации систем адаптивного управления с идентификатором. Вместе с тем требуется срав-

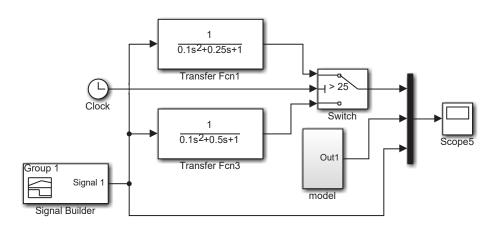


Рис. 6. Идентификация объекта с переменными параметрами

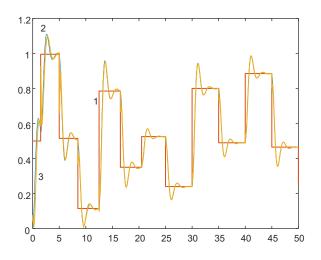


Рис. 7. Переходный процесс: 1 — задающее воздействие; 2 — выход объекта; 3 — выход модели

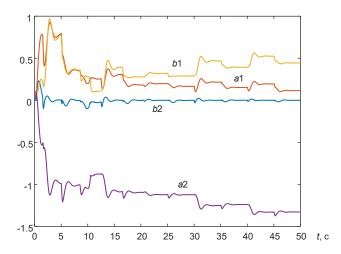


Рис. 8. Оценки параметров модели объекта

нительный анализ преимуществ использования HC Хопфилда для идентификации по отношению к реккурентному методу наименьших квадратов.

- 1. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.832 с.
- 2. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов. М: Энергия, 1979. 240 с.
- 3. *Льюнг Л*. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
- 4. *Omidvar O., Elliott D. L.* eds. Neural systems for control // Academic Press. New York. 1997. Pp. 272.
- 5. *Hagan M. T., Demuth H. B.* Neural networks for control // Proceedings of the 1999 American Control Conference. San Diego: CA, 1999. Pp. 1642–1656.
- 6. Kuschewski J. G., Hui S., Zak S. H., Application of Feedforward Neural Networks to Dynamical System Identification and Control// IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993. Vol. 1. Pp. 37–49.
- 7. Narendra K., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural network // IEEE Transaction on neural network. 1990. No. 1. P. 4–27.
- 8. *Бураков М. В.* Нейросетевая идентификация // Завалишинские чтения'15: сб. докл. ГУАП. 2015. С. 49–54.
- 9. *Бураков М. В., Кирпичников А. П.* Нейроэмулятор на базе гибридной нейронной сети // Вестник Казанского технологического ун-та. 2015. Т. 18. № 9. С. 211–214.
- 10. Hopfield J. J. Neural networks and phisical systems with emergent collective computational abilities // Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. 1982. Vol. 79. Pp. 2554–2558.
- 11. Lee C. H., Teng C. C. Identification and control of dynamic systems using recurrent fuzzy neural networks // IEEE Transaction on fuzzy systems. 2000. Vol. 8. No. 4. P. 349–366.
- 12. *Бураков М. В.* Решение алгебраических уравнений при помощи нейронной сети Хопфилда // Завалишинские чтения'17: сб. докладов. ГУАП, 2017. С. 14–18.

УДК 681.5

М. В. Бураков

кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

НЕЙРОСЕТЕВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАБЛЮДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Рассматривается задача нейросетевой реализации наблюдающего устройства для модального регулятора. Линейная нейронная сеть обучается с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Достоинство предлагаемого подхода заключается в том, что редукция наблюдающего устройства не требует дополнительных расчетов или обучения. Результаты вычислительных экспериментов в MatLab демонстрируют эффективность предлагаемой методики.

Ключевые слова: модальное управление, наблюдатель состояния, нейронная сеть.

M. V. Burakov

PhD, Associate Professor

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION OF THE STATE OBSERVER

The problem of neural network implementation of the state observer for the modal controller is considered. The linear neural network is trained using the algorithm for back propagation of the error. The advantage of the proposed approach is that the reduction of the state observer does not require additional calculations or training. The results of computational experiments in MatLab demonstrate the effectiveness of the proposed methodology.

Keywords: modal control, state observer, neural network.

Постановка задачи

Одно из главных преимуществ модального управления заключается в том, что обратные связи по состоянию безынерционны и не повышают порядок системы [1, 2].

Сигнал управления описывается формулой

$$U = -KX$$

где ${\bf X}$ – вектор состояния, ${\bf K}$ – вектор коэффициентов обратной связи.

Проблема управления по состоянию заключается в том, что на практике некоторые компоненты ${\bf X}$ могут быть неизвестны по одной из двух причин:

- измерительных приборов может быть недостаточно;
- переменные состояния могут не иметь физического смысла.

Однако если система является наблюдаемой, то все компоненты вектора состояния \mathbf{X} могут быть восстановлены по наблюдениям вектора выхода системы \mathbf{Y} . Иначе говоря, если система наблюдаемая, то все компоненты вектора состоя-

ния вносят свой вклад в выходной сигнал системы.

При анализе детерминированных систем задача оценки всех переменных состояния управляемого объекта может быть решена с помощью наблюдающего устройства (наблюдателя) Люинбергера [3]. Входными сигналами для наблюдателя служат измеряемые компоненты Y, а также поступающие на него входные воздействия – компоненты U.

Различают наблюдатели полного порядка и редуцированные наблюдающие устройства, в которых восстанавливается только неизвестная часть вектора состояния. Редуцированный наблюдатель является отдельной динамической системой, и его нельзя получить из полного наблюдателя путем простого изменения размерности системы [4].

Искусственные нейронные сети (НС) в последние годы широко применяются в системах управлении [5–7]. Использование НС, которая обучается на модели системы управления, может быть альтернативным вариантом конструирования наблюдающего устройства.

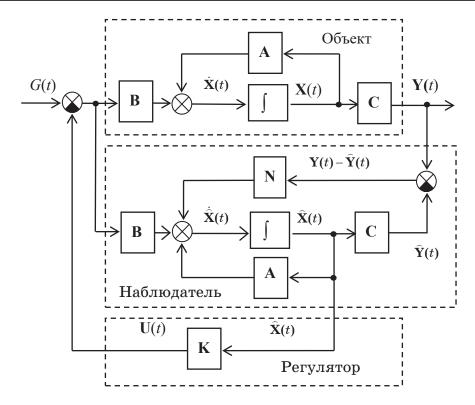


Рис. 1. Система с наблюдающим устройством

Нейросетевой наблюдатель

Наблюдатель Люинбергера представляет собой динамическую систему, которая является моделью объекта:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \\ \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}, \end{cases}$$

где $\hat{\mathbf{X}}(t)$ — оценка состояния объекта, $\hat{\mathbf{Y}}(t)$ — оценка выхода, \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} — матрицы объекта.

Ошибка выхода наблюдателя:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \widehat{\mathbf{Y}} = \mathbf{C}(\mathbf{X} - \widehat{\mathbf{X}}) = \mathbf{C}\mathbf{E},$$

где Е - ошибка по состоянию.

Если начальное состояние объекта и модели совпадают и модель адекватна объекту, то можно полагать в любой момент времени, что

$$\hat{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{X}(t)$$
.

Однако практически добиться полной адекватности объекта и модели невозможно, трудно добиться и полного равенства начальных условий. Поэтому на практике можно рассчитывать лишь на выполнение условия

$$\lim_{t\to\infty}\widehat{\mathbf{X}}(t)=\mathbf{X}(t).$$

Подобным свойством обладают так называемые асимптотические наблюдающие устройства, которые используют обратную связь по ошибке восстановления вектора состояния, так что работа наблюдающего устройства описывается системой

$$\begin{vmatrix} \hat{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{N}(\mathbf{Y}(t) - \hat{\mathbf{Y}}(t)), \\ \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t), \end{vmatrix}$$

где N — матрица параметров наблюдающего устройства (рис. 1).

Как показывает рис. 1, наблюдатель можно представить в виде динамической системы, имеющей два входа (рис. 2).

Если собственные числа матрицы $\mathbf{A} - \mathbf{NC}$ имеют отрицательную вещественную часть, то с течением времени ошибка состояния уменьшится до нуля. Процессы в наблюдателе должны протекать более быстро, чем переходный процесс в системе. Эмпирически установлено, что наблюдатель должен обладать быстродействием, в 2-4 раза превышающим быстродействие системы [3, 4].

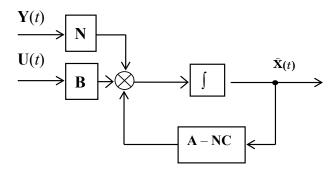


Рис. 2. Наблюдатель как динамическая система

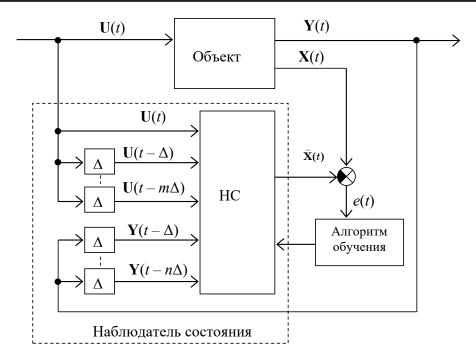


Рис. 3. Обучение нейросетевого наблюдателя состояния

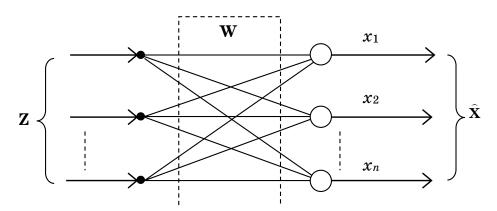


Рис. 4. Структура нейросетевого наблюдателя

Таким образом, задача синтеза наблюдателя выполняется подобно задаче синтеза модального регулятора. Редуцированный наблюдатель состояния требует построения новой модели, отличной от модели объекта.

В настоящей работе предлагается альтернативный подход к конструированию наблюдающего устройства, который основывается на использовании искусственной НС прямого распространения. Поскольку НС этого типа являются статическими, для моделирования структуры (рис. 2) требуется использовать обратные связи, подавая на вход НС задержанные выходы объекта (рис. 3).

Для линейного объекта может быть использована НС с линейными активационными функциями нейронов, количество которых равно порядку объекта *п*. Как известно, многослойная линейная НС может быть сведена к однослойной, поэтому при обучении нейросетевого наблюдате-

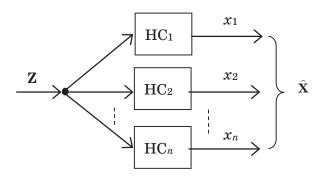


Рис. 5. Наблюдатель как совокупность независимых НС

ля требуется получить значения матрицы весов ${f W}$ (рис. 4).

Как показывает рис. 4 (где **Z** – вектор входа), выходы линейных HC не зависят друг от друга, эта особенность позволяет легко менять порядок наблюдателя просто путем выбора необходимого набора компонентов состояния (рис. 5).

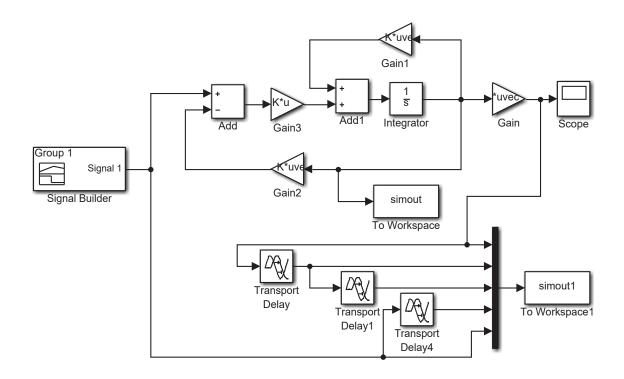


Рис. 6. Подготовка данных для обучения

Редуцированный наблюдатель оказывается составной частью наблюдателя полного порядка. В этом заключается основное преимущество по отношению к традиционной схеме, где наблюдатель полного порядка и редуцированный наблюдатель представляют собой разные динамические системы.

Пример моделирования

Рассмотрим объект управления, заданный передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{3s+1}{s^3 + 4s^2 + 2s + 1}.$$

При переходе в пространство состояний описание объекта задают матрицы

$$A = egin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ -0.5 & -1 & -4 \end{bmatrix}; \quad B = egin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}; \\ C = egin{bmatrix} 0.25 & 0.75 & 0 \end{bmatrix}.$$

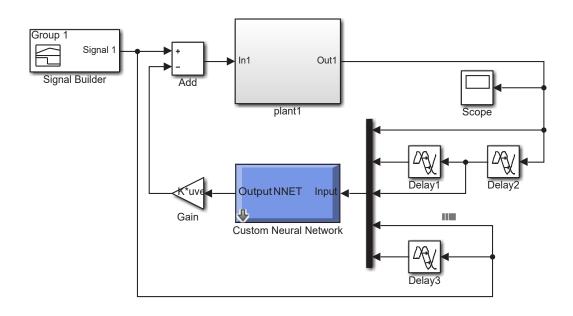
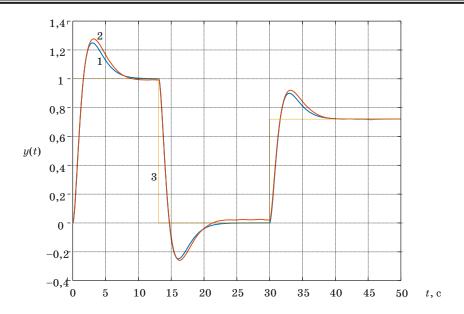


Рис. 7. Система с нейросетевым наблюдателем



Puc. 8. Сравнение переходных процессов: 1 — традиционный наблюдатель; 2 — нейросетевой наблюдатель; 3 — входное воздействие

Выберем положение полюсов регулятора P_1 и наблюдателя P_2 :

$$P_1 = [-1 \ -1 \ -1]; P_2 = [-2 \ -2 \ -2].$$

На рис. 6 представлена схема для накопления данных при обучении наблюдающего устройства. На рис. 7 показано включение наблюдающего устройства в контур системы управления.

Как показывает рис. 8, переходные процессы оказываются достаточно близкими.

Нейронная сеть имеет всего три нейрона, что соответствует порядку объекта управления. Обучение выполняется с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, реализованного в пакете Neural Network toolbox Simulink MatLab.

Заключение

Нейросетевая реализация наблюдающего устройства обеспечивает основное преимущество, которое заключается в том, что каждой компоненте вектора состояния соответствует своя НС, поэтому можно выбирать для управления любой набор переменных состояния. Следовательно, редуцированный наблюдатель является составной частью наблюдателя полного порядка, не требующей отдельного расчета параметров. Кроме того, наблюдатель на базе НС является безынерционным, что практически исключает проблему расхождения начального состояния наблюдающего устройства и объек-

та, поскольку использует только вход-выходные сигналы.

Предлагаемый подход к реализации наблюдающего устройства на базе HC может быть эффективно использован при конструировании цифровых систем управления динамическими объектами.

- 1. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.
- $2.\ \Gamma y \partial \mathcal{B} \mathcal{U} H \ \Gamma.\ K.,\ \Gamma pe \mathcal{G} e \ C.\ \Phi.,\ Caльга \partial o\ M.\ \partial.\ Про-ектирование систем управления. М.: Бином, <math>2004.\ 911\ c.$
- 3. Luenberger D. G. An Introduction to Observers // IEEE Transactions of Automatic Control. 1971. Pp. 596–602.
- 4. *Кузовков Н. Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение. 1976. 183 с.
- 5. *Омату С., Халид М., Юсоф Р*. Нейроуправление и его приложения / под ред. А. И. Галушкина, В. А. Птичкина. М.: ИПРЖР, 2000.
- 6. Васильев В. И., Ильясов Б. Г., Кусимов С. Т. Нейрокомпьютеры в авиации. М.: Радиотехника, 2004. 496 с.
- 7. *Бураков М. В.* Нейронные сети и нейроконтроллеры. СПб.: ГУАП, 2013. 284 с.

УДК 681.5

М. В. Бураков

кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

Рассматривается проблема модального синтеза с учетом нулей передаточной функции объекта управления, которые могут оказывать сильное влияние на качество переходных процессов. Предлагается алгоритм выбора расположения полюсов желаемой системы с помощью процедуры генетической оптимизации. Приводятся результаты вычислительных экспериментов в MatLab, подтверждающие эффективность рассмотренной методики.

Ключевые слова: модальное управление, нули передаточной функции, генетический алгоритм.

M. V. Burakov

PhD, Associate Professor

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

GENETIC SYNTHESIS OF THE MODAL CONTROLLER

The problem of modal synthesis is considered taking into account the zeros of the transfer function of the control plant, which can have a strong influence on the quality of transient processes. An algorithm is proposed for choosing the location of the poles of the desired system using the genetic optimization procedure. The results of computational experiments in MatLab are presented, which confirm the effectiveness of the technique considered.

Keywords: modal control, zeros of transfer function, genetic algorithm.

Основная идея метода пространства состояний заключается в описании поведения системы как точки, перемещающейся в определенном евклидовом пространстве. Выбор желаемой траектории движения этой точки происходит с помощью метода модального управления, при котором за счет введения обратных связей по состоянию обеспечивается помещение полюсов замкнутой системы в заданные положения [1–3].

Метод модального управления имеет известные преимущества, а именно:

- 1. Возникает возможность аналитического исследования системных свойств объектов управляемости, наблюдаемости, идентифицируемости.
- 2. Синтезированная система не требует проверки на устойчивость.
- 3. Могут единообразно описываться многомерные и одномерные системы.
- 4. Обратные связи по состоянию безынерционны и не повышают порядок системы.

Однако метод модального управления имеет ряд особенностей, усложняющих процесс синтеза регулятора. Например:

- 1. Переменные состояния могут быть недоступны непосредственному измерению.
- 2. При модальном синтезе может возникать статическая ошибка, для устранения которой необходимо использовать входной масштабирующий коэффициент или расширять вектор состояния.
- 3. При модальном синтезе назначается расположение полюсов желаемой замкнутой системы, но при этом не учитывается влияние нулей объекта на динамику системы [4].

Первая из указанных проблем находит удовлетворительное решение за счет использования наблюдающих устройств, восстанавливающих вектор состояния объекта по его вектору выхода [3].

Вторая проблема также легко решается с использованием стандартных процедур проектирования.

Третья проблема в настоящее время не имеет строгого аналитического решения, хотя нули могут оказывать значительное влияние на переходный процесс. В настоящей работе предлагается решение проблемы учета системных нулей

с помощью генетической оптимизации расположения полюсов замкнутой системы.

Постановка задачи

Традиционная процедура модального синтеза сводится к следующим шагам [1–3]:

- 1. Исследуется управляемость и наблюдаемость динамического объекта.
- 2. Назначается желаемое расположение полюсов замкнутой системы путем выбора из заданного набора кривых переходного процесса желаемой характеристики и связанного с ней стандартного полинома с определенными коэффициентами.
- 3. Аналитически рассчитываются коэффициенты обратных связей по состоянию с помощью канонической формы управляемости или формулы Аккермана.
- 4. При необходимости синтезируется наблюдатель состояния.
- 5. Для описания желаемого расположения полюсов могут быть использованы стандартные полиномы Ньютона, Баттерворта, Чебышева или Бесселя, а также корневые показатели качества. Полиномы Ньютона позволяют, например, описать апериодические переходные процессы, а полиномы Баттерворта слабо колебательные процессы с заданным временем установления [3].
- 6. При модальном синтезе рассматривается только общее решение дифференциального уравнения, учитывающее параметры системы и ее реакцию на задающее воздействие. При этом не учитывается влияние вынужденной составляющей решения, которая зависит от нулей. Для многих объектов влияние нулей незначительно, но иногда неучет нулей не позволяет эффективно применить модальный синтез.
- 7. Проблема учета нулей объекта при модальном синтезе на данный момент не имеет общепринятого решения и допускает использование различных подходов, в которых обычно делается попытка аналитического описания влияния нулей при модальном синтезе [4–8].
- 8. Так, в работе [5] для учета влияния нулей использован метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов. В [6] показана возможность разработки специальных диаграмм, позволяющих более точно обеспечивать требуемые показатели качества переходных процессов в системе для учета влияния нулей «справа». В работе [7] для проведения анализа свойств математической модели используется инвариантная по отношению к базису характеристика объекта - матрица вырожденности. Предложен способ декомпозиции модели объекта управления с использованием вычетов передаточной функции. В [8] рассматривается метод управления спектром системных нулей путем изменения матрицы выхода, который позволяет получать

множество решений задачи в общем виде с помощью технологии канонизации матриц.

В настоящей работе предлагается отказаться от поиска аналитического решения задачи учета нулей при модальном синтезе в пользу комбинации аналитических методов и методов поисковой оптимизации.

Генетическая оптимизация положения полюсов замкнутой системы

При модальном синтезе с учетом системных нулей возможно множество «субоптимальных» решений, поэтому поставленная проблема относится к задачам глобальной оптимизации.

Генетический алгоритм (ГА) является предметно-независимым методом глобальной оптимизации, он принадлежит к классу популяционных метаэвристических алгоритмов [9]. Применительно к задаче модального синтеза ГА может использоваться в двух вариантах: непосредственный поиск коэффициентов обратных связей и поиск расположения полюсов замкнутой системы на комплексной плоскости.

В процессе оптимизации используется не стандартный полином, а соответствующий ему переходный процесс, воспроизводимый эталонной моделью. Таким образом, аналитический расчет заменяется процедурой поисковой оптимизации, в процессе которой изменяются коэффициенты обратных связей вплоть до обеспечения максимального сходства заданного переходного процесса и реального процесса в системе с обратной связью.

Схема генетической оптимизации модального регулятора скалярной системы представлена на рис. 1.

На рис. 1 приняты обозначения: \mathbf{X} — вектор состояния, \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} — матрица параметров объекта, вектор входа и выхода, \mathbf{K} — вектор коэффициентов обратных связей, u(t) — сигнал управления, g(t) — задающее воздействие, k_m — масштабирующий коэффициент, y(t) и $y^*(t)$ — реальный

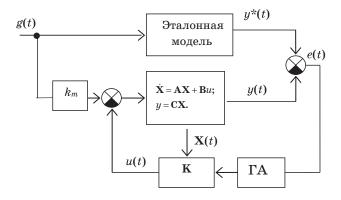


Рис. 1. Генетический синтез вектора обратных связей

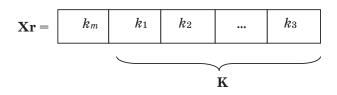


Рис. 2. Кодирование параметров регулятора, вариант 1

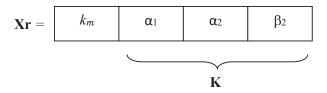


Рис. 3. Кодирование параметров регулятора, вариант 2

и желаемый переходные процессы, e(t) — ошибка выхода объекта.

Минимизируемая функция может быть представлена в виде

$$J_1(\mathbf{K}) = \int_0^T |e(t)| dt$$
 или $J_2(\mathbf{K}) = \int_0^T e^2(t) dt$.

Коэффициент k_m зависит от ${\bf K}$:

$$k_m = \left(-\mathbf{C}(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{B}\right).^{-1}$$

Поэтому для сокращения вычислений удобно хромосому \mathbf{Xr} представить в следующем виде (рис. 2).

Непосредственная оптимизация коэффициентов обратных связей может вызывать нежелательные эффекты. Например, может оказаться малым значение степени устойчивости или слишком большим значение колебательности системы. Поэтому при генетическом синтезе можно учитывать ограничения на положение полюсов замкнутой системы. В этом случае на

каждом шаге оптимизации должно выполняться вычисление коэффициентов обратной связи по формуле Аккермана.

Например, пусть система 3-го порядка имеет один полюс действительного типа $\lambda_1=\alpha_1$ и два комплексных полюса: $\lambda_{2,3}=-\alpha_2\pm j\beta_2$. Тогда хромосома приобретает вид, показанный на рис. 3.

Для генетического синтеза модального регулятора могут быть использованы возможности пакета *Optimization tool MatLab* [9].

Пример моделирования

Рассмотрим пример моделирования для объекта, имеющего нуль на комплексной плоскости слева от мнимой оси:

$$W(s) = \frac{4s+1}{s^3+2,5s^2+s+1}.$$

Пусть желаемая замкнутая система W^* задана с помощью передаточной функции (П Φ):

$$W*(s) = \frac{1}{0,005s^3 + 0,075s^2 + 0,25s + 1}.$$

Желаемая система W^* имеет следующий набор полюсов:

$$P = [-12,25,-1,37+3,8j,-1,37-3,8j].$$

После перехода к описанию объекта в пространстве состояний и использования формулы Аккермана получаем следующий набор коэффициентов обратных связей:

$$K = [6,25 24,5 99,5].$$

На рис. 4 показано сравнение заданного и полученного переходных процессов, которое демонстрирует влияние нулей объекта.

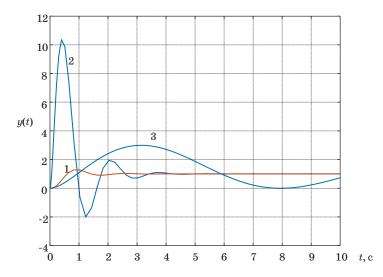


Рис. 4. Реакция на единичный скачок:

1 – эталонный переходный процесс; 2 – система с модальным регулятором; 3 – система без регулятора

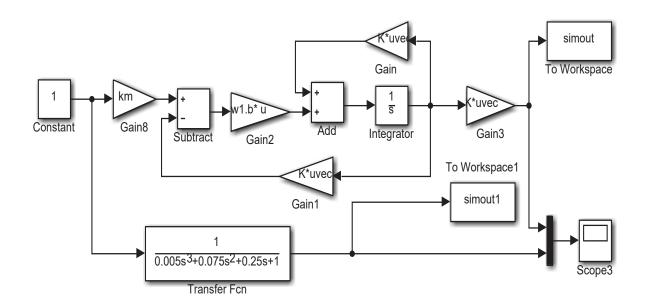


Рис. 5. Блок-схема генетического синтеза в Simulink MatLab

Как показывает рис. 4, в системе обеспечивается нулевая статическая ошибка, но время переходного процесса и особенно перерегулирование сильно отличаются от заданных значений. Поэтому при модальном синтезе требуется определить такое положение полюсов замкнутой системы, при котором обеспечивается близость переходных процессов.

На рис. 5 показана схема проведения эксперимента. Массивы *simout* служат для накопления данных для расчета функции ошибки, хромосома кодируется в соответствии с рис. 2.

В результате генетической оптимизации были получены следующие параметры:

$$K* = [1,436 \ 10,298 \ 2,089]; k_m = 5,157;$$

На рис. 6 представлено сравнение заданного и полученного переходных процессов.

Используя полученный вектор K, можно вычислить спектр матрицы замкнутой системы A-BK:

$$P* = [-0.26 - 2.56 + 3.7j - 2.56 - 3.7j].$$

Очевидно, что \mathbf{P}^* сильно отличается от \mathbf{P} , хотя кривые переходных процессов достаточно близ-

Рассмотрим далее объект, заданный $\Pi\Phi$ с правым нулем:

$$W(s) = \frac{0,25s-1}{s^3+2,5s^2+s+1};$$

Пусть желаемые полюса замкнутой системы заданы вектором ${\bf P.}$

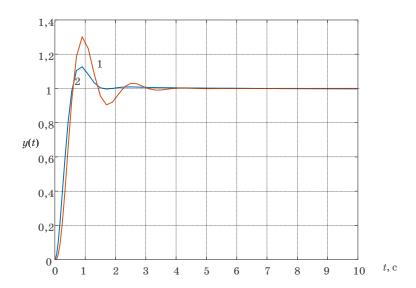


Рис. 6. Эталонный переходный процесс (1) и переходный процесс в системе с генетически синтезированным модальным регулятором (2)

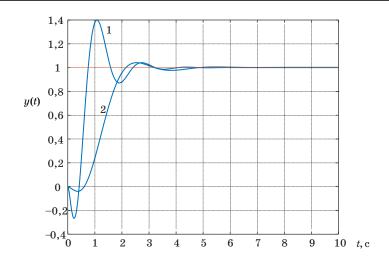


Рис. 7. Переходный процесс: 1 – при заданных полюсах; 2 – при генетически оптимизированных

После перехода к описанию в пространстве состояний по формуле Аккермана получаем вектор коэффициентов обратных связей (при $k_m = -199,88$):

$$K = [12,49 \ 48,88 \ 198,88].$$

Генетическая оптимизация дала следующий вектор обратных связей (при $k_m = -7,43$):

$$K* = [0,9137,046,44].$$

Этому вектору соответствуют полюса замкнутой системы:

$$P* = [-1,43 -0,99+2,05j -0,99-2,05j].$$

На рис. 7 показано сравнение двух вариантов модального управления.

Как показывает рис. 7, переходные процессы имеют примерно одинаковое время, но оптимизированным полюсам соответствует намного меньшее перерегулирование. Но основное пре-

имущество генетической оптимизации здесь заключается в уменьшении энергетических затрат (рис. 8).

Коэффициенты вектора K во много раз больше коэффициентов K^* , соответственно, энергетические затраты на управление после оптимизации полюсов во много раз меньше.

Таким образом, метод модального управления является аналитическим и обеспечивает широкие возможности по проектированию односвязных и многосвязных линейных систем управления. Однако показатели качества регулирования в этом методе связаны только с положением полюсов замкнутой системы. Процедура модального синтеза может приводить к неудовлетворительному результату при наличии системных нулей.

Предложенная процедура модального синтеза отличается тем, что описание желаемой системы дается не с помощью набора полюсов, а с помощью эталонной модели, соответствующей этим полюсам. Таким образом, происходит

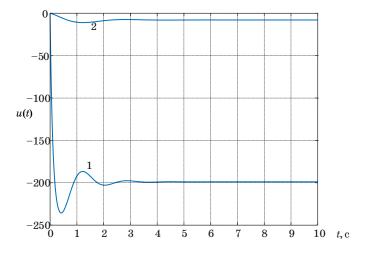


Рис. 8. Изменение сигнала управления: 1 – заданные полюса; 2 – оптимизированные полюса

не аналитический расчет коэффициентов обратных связей по состоянию, а поисковая оптимизация коэффициентов (или расположения полюсов). В результате обеспечивается близость (но не идентичность) переходных процессов в системе. Иначе говоря, ищется субоптимальное решение задачи модального синтеза. Генетический алгоритм является адекватным инструментом для решения этой задачи, позволяющим учитывать возможные ограничения при поиске решения.

Приведенные примеры моделирования задачи модального синтеза в $MatLab\ Simulink$ показывают, что предлагаемая методика может быть эффективна при наличии как «левых», так и «правых» нулей системы.

Рассмотренный алгоритм может применяться при проектировании различных систем управления, в том числе — в электромеханике и робототехнике.

- 1. *Заде Л.*, *Дезоер Ч.* Теория линейных систем. Метод пространства состояний. М.: Наука, 1970. 704 с.
- 2. Деруссо Π ., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. М.: Наука, 1970. 620 с.

- 3. Кузовков H. T. Модальное управление и наблюдающие устройства // Машиностроение. М., 1976. 183 с.
- 4. *Смагина Е. М.* Взаимосвязь проблемы задания передаточных нулей и метода модального управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 1996. № 2. С. 39–43.
- 5. Тютиков В. В., Воронин А. И. Анализ влияния нулей передаточной функции объекта на параметрическую чувствительность систем, синтезированных по методу АКАР // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. 2012. С. 48–51.
- 6. Вороной В. В., Воевода А. А. О влиянии нулей «справа» на переходные процессы в системе // Сб. науч. трудов. НГТУ. 2013. № 2 (72). С. 19—29.
- 7. Aбдуллин А. А., Дроздов В. Н., Маматов А. Г. Влияние нулей передаточной функции объекта на свойства регулятора // Тр. СПИИРАН. 2017. Вып. 4(53). С. 73–96.
- 8. Асанов А. З., Демьянов Д. Н. Аналитическое конструирование систем управления многосвязными динамическими объектами с учетом передаточных нулей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XII Междунар. конф. Самара: Самарский НЦ РАН, 2010. С. 218–223.
- 9. *Бураков М. В.* Генетический алгоритм: теория и практика. СПб.: ГУАП. 2008. 164 с.

УДК 681.5

М. В. Бураков*

кандидат технических наук, доцент

М. С. Брунов*

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

НЕЧЕТКАЯ МОДИФИКАЦИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ С ИДЕНТИФИКАТОРОМ

Рассматривается модификация системы адаптивного управления с идентификатором параметров объекта. Предлагается использовать на выходе регулятора блок нечеткого согласования «старого» и «нового» законов управления для устранения резких колебаний выходного сигнала объекта. Приводятся результаты компьютерного моделирования, подтверждающие практическую полезность предлагаемой схемы адаптивного управления.

Ключевые слова: адаптивная система, идентификация, нечеткий логический регулятор.

M. V. Burakov*

PhD, Tech., Associate Professor

M. S. Brunov*

Senior Lecturer

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

FUZZY MODIFICATION OF ADAPTIVE SYSTEM WITH IDENTIFIER

The modification of the adaptive control system with the plant parameters identifier is considered. It is proposed to use at the output of the regulator a block of fuzzy matching of the "old" and "new" control laws to eliminate sharp fluctuations in the output signal of the plant. The results of computer simulations confirming the practical usefulness of the proposed scheme of adaptive control are presented.

Keywords: adaptive system, identification, fuzzy logic controller.

Задача адаптации возникает в системах автоматического управления при необходимости работы в условиях дрейфа параметров объекта или внешней среды [1–3]. Концепция адаптивного управления с идентификацией предполагает, что на первом этапе выполняется определение параметров модели объекта, а на втором — синтез регулятора для этой модели (рис. 1, где p(k) — параметры регулятора, u(k) — сигнал управления, y(k) — выход объекта, $\theta(k)$ — параметры модели, g(k) — задающее воздействие).

Для определения неизвестных параметров линейной модели объекта наиболее часто применяется рекуррентный метод наименьших квадратов (РМНК). По результатам идентификации автоматически проектируется линейный регулятор. При этом предполагается выполнение гипотезы квазистационарности — изменения объекта управления происходят медленнее, чем адаптация регулятора.

Таким образом, если параметры объекта управления меняются достаточно медленно, то

адаптивная система может работать удовлетворительно. Однако при быстром изменении параметров качество управления может значительно ухудшаться — в переходных процессах на выходе системы появляются «выбросы», вызванные скачками параметров регулятора.

В настоящей работе рассматривается модификация адаптивной системы с идентификатором параметров объекта, в которой используется механизм сглаживания сигнала управления с использованием механизма нечеткой логики [4]. Подобный подход был ранее описан в работе [5] для согласования областей действия локальных линейных регуляторов нелинейной системы.

Адаптивная система с идентификатором

Рассмотрим для простоты описания линейную систему, заданную дискретной передаточной (ПФ) функцией 1-го порядка. Таким образом, система имеет два неизвестных па-

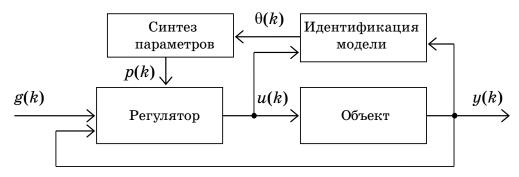


Рис. 1. Адаптивное управление с адаптацией

раметра, которые являются коэффициентами числителя и знаменателя соответствующей дискретной ПФ. Целью управления является поддержание выходного сигнала системы на заданном постоянном уровне. Вначале производится идентификация параметров методом РМНК, затем синтез линейного регулятора по результатам идентификации. Основному исследованию подвергается поведение системы в момент скачкообразного изменения параметров объекта, за которым следует изменение параметров регулятора.

Для идентификации параметров объекта был использован рекуррентный метод наименьших квадратов (РМНК).

Процедура РМНК описывается следующими формулами [6]:

$$\begin{split} \mathbf{K}(k) &= \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)}{1+\mathbf{z}^{\mathrm{T}}(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{z}(k)} , \\ \mathbf{P}(k) &= \mathbf{P}(k-1) - \mathbf{K}(k)\mathbf{z}^{\mathrm{T}}(k)\mathbf{P}(k-1) , \\ \Theta(k) &= \Theta(k-1) + \mathbf{K}(k) \left[y(k) - \mathbf{z}^{\mathrm{T}}(k)\Theta(k-1) \right] , \end{split}$$

где: $\mathbf{K}(k)$ — вектор коррекции предыдущей оценки на основании текущих данных, $\mathbf{P}(k)$ — вспомогательная матрица, содержащая текущие значения входного и выходного сигналов, $\Theta(k)$ — вектор новых оценок параметров, $\mathbf{z}(k)$ — регрессивный вектор (предсказатель).

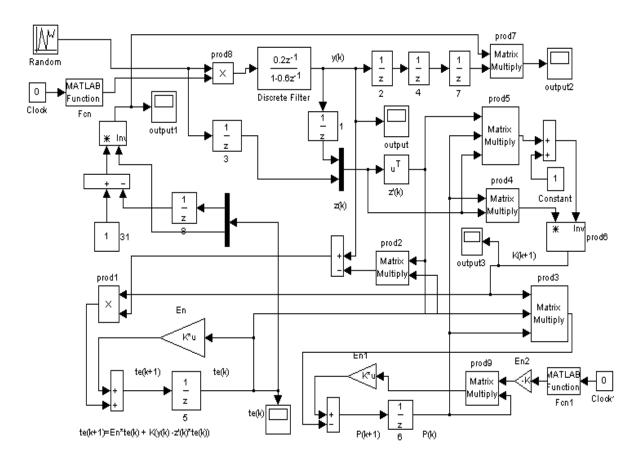


Рис. 2. Блок-схема адаптивной системы с идентификатором

На схеме, приведенной на рис. 2, алгоритм РМНК реализован средствами пакета *MatLab Simulink*.

Использование РМНК сопряжено с возникновением проблемы вырожденности измерений. Для упрощения задачи будем считать, что момент начала идентификации может быть определен по началу изменения выхода объекта. Время моделирования k=50 тактов. На 20-м такте происходит скачкообразное изменение параметров модели объекта. Целью управления является поддержание выхода системы на постоянном уровне.

Как показало моделирование, для удовлетворительной работы идентификатора необходимо как можно раньше вернуть значения вспомогательной матрицы **P** к первоначальному (стартовому) значению. В противном случае работа идентификатора оказывается неудовлетворительной. Момент перенастройки параметров идентификатора может быть определен по выходу системы управления.

Изменения, происходящие в системе, проявлялись в виде последовательности «всплесков», которые прослеживались на выходе системы с регулятором, на выходе идентификатора и на выходе регулятора, синтезированного по оценкам параметров. Результаты моделирования показаны на рис. 3.

Как показывает рис. 4, увеличение «всплесков» происходит при задержке перенастройки идентификатора до трех и десяти тактов.

Таким образом, систему можно было бы считать вполне работоспособной, если бы не возникновение серии кратковременных всплесков при скачкообразном изменении параметров модели. Для решения этой проблемы необходимо обеспечить плавное изменение сигнала управления при включении «нового» регулятора, синтезированного по параметрам модели после идентификации.

Блок нечеткого регулирования

Свойство нечеткости позволяет описать одновременную принадлежность объекта к нескольким множествам. Для рассматриваемой задачи нужно использовать временную шкалу, размер которой ΔT соответствует интервалу, с которым выполняется идентификация и обновление параметров регулятора (рис. 5).

На рис. 5 нечеткие множества k_1 и k_2 обозначают «степени запуска» двух регуляторов, один из которых соответствует «старым» параметрам объекта, а второй — «новым» параметрам, которые получились в результате последней идентификации. Таким образом, задача состоит в том, чтобы сформировать плавный «финиш» для ис-

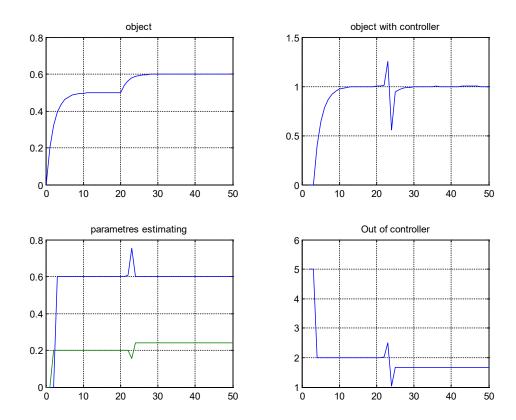


Рис. 3. Реакция системы на скачок параметра

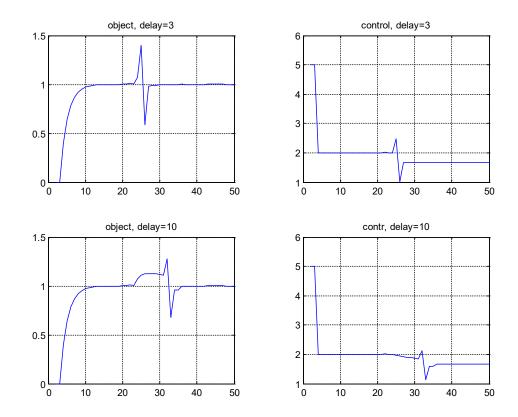
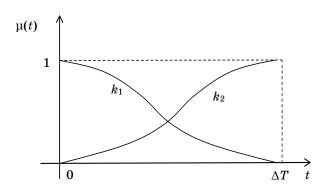


Рис 4. Задержка перенастройки идентификатора на 3 и 10 тактов



Puc. 5. Нечеткое описание «степени запуска» регуляторов

ходного регулятора и плавный «старт» для обновляющегося.

На рис. 6 приведена схема нечеткого согласования законов управления.

Результаты моделирования

В процессе моделирования был исследован алгоритм нечеткого «согласования» регуляторов. В начале работы системы используются два одинаковых регулятора. Их параметры определяются по результатам идентификации. В каждый момент времени один регулятор является «старым», полученным при предыдущей иден-

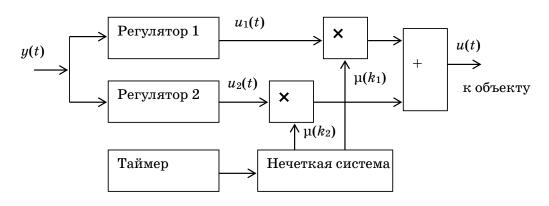
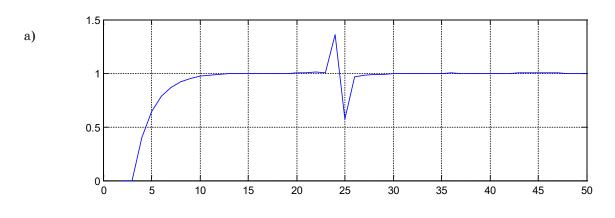


Рис. 6. Формирование выхода адаптивного регулятора



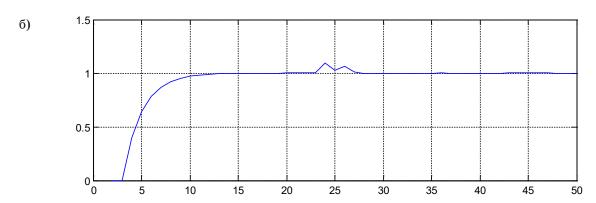


Рис 7. Сравнение регуляторов: а – исходный вариант; б – с нечетким согласованием

тификации, а второй — «новым», полученным в результате текущей идентификации. Степень запуска «старого» постепенно уменьшается до нуля, так что к концу ΔT будет работать только новый регулятор. Если затем параметры объекта не изменяются, то в соответствии с рис. 5 и 6 параметры регулятора также не изменяются, и после истечения интервала ΔT регуляторы становятся одинаковыми. Как показало моделирование, такая схема способна существенно улучшить переходный процесс (рис. 7).

Рассмотренная модификация системы адаптивного управления с идентификатором отличается простотой и может быть полезна в ситуации, когда параметры объекта управления изменяются достаточно быстро, так что идентификационная процедура сильно влияет на закон управления. Это выражается в возможных скачках выходного сигнала объекта управления. Приведенные примеры моделирования рассматривают простой дискретный объект 1-го порядка, однако рассмотренная схема управления легко обобщается для широкого класса динамических объектов. Внесение нечеткости в процесс формирования сигнала управления позволяет исключить его возможные резкие колебания и

улучшить качество переходных процессов в системе.

- 1. Александровский Н. М., Егоров С. В., Кузин Р. Е. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими объектами / под общ. ред. Н. М. Александровского. М.: Энергия, 1973.
- 2. Самонастраивающиеся системы. Справочник / под ред. П. И. Чинаева. Киев: Наукова думка, 1969.
- 3. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / пер. с англ.; под ред. Н. С. Райбмана. М.: Мир, 1975.
- 4. *Бураков М. В.* Нечеткие регуляторы. СПб.: ГУАП, 2010. 237 с.
- 5. *Бураков М. В., Брунов М. С.* Структурная идентификация нечеткой модели // Тр. СПИИ-РАН. 2014. Вып. 3(34). С. 232–246.
- 6. Дейч А. М., Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия, 1979. 240 с.

УДК 621.391

И. А. Галкин*

кандидат технических наук, доцент

Р. Х. Чотчаев*

адъюнкт

П. П. Андрианов*

курсант

* Военный институт (военно-морской) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ В ПОДВОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В ЕДИНОЙ ЛО-КАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ВМФ

В статье приведена организация обмена информацией по оптическому каналу в подводном пространстве, позволяющая повысить эффективность применения единой локальной информационно-управляющей системы ВМФ при обеспечении действий морских робототехнических комплексов военного назначения, в том числе и в оперативно-важных районах Мирового океана.

Ключевые слова: обмен информацией, информационно-управляющие системы ВМФ

I. A. Galkin*

PhD, Tech., Associate Professor

R. K. Chotchaev*

Adjunct

P. P. Andrianov*

Cadet

*Naval Academy

ORGANIZATION OF DELIVERY INFORMATION IN THE UNDERWATER IN THE UNIFIED LOCAL INFORMATION AND CONTROL SYSTEM OF THE NAVY

The article provides the organization of information delivery on the optical channel in the underwater space, which makes it possible to increase the efficiency of the application of a unified local information and control system of the Navy while ensuring the actions of marine robotic complexes for military use, including in the operationally important regions of the World Ocean.

Keywords: information delivery, information and control systems of the Navy.

Возобладавшая в последнее время идеология построения сетецентрического пространства в районе применения сил, особенно при разработке способов группового применения робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН), является одним из основных направлений развития средств и методов ведения войны на море и под водой. Развитие организации единой информационно-коммутационной сети для обеспечения выполнения задач силами военно-морского флота было затронуто в работах Илларионова Г. Ю., Матвиенко Ю. В., Подражанского А. М., Шашкова Н. Л. [1–4].

Основой сетецентрической идеологии является создание единой информационно-коммутационной сети на поле боя, связывающей источники освещения обстановки, центры управления силами (войсками) военно-морского флота и непосредственно силы (войска), действующие в районе выполнения задач. Информационное превосходство достигается за счет оперативного доведения информации об обстановке до потребителей непосредственно в районе действий. Это позволяет увеличить темп проводимых операций, эффективность взаимодействия при применении вооружения и технических средств. Единое сете-

центрическое пространство позволяет организовать комплексное применение военной и специальной техники при выполнении поставленной задачи, способствует более эффективному ведению боевых действий на основе преимуществ, которые дает его использование в динамике боевых действий.

Особенно важным является возможность обеспечить надежный и быстрый обмен информацией летательных аппаратов и надводных объектов с подводными [5]. Это позволит получать оперативную информацию об окружающей обстановке в районе действия сил, осуществлять управление в режиме времени, близком к реальному.

Такой принцип организации обмена информацией в настоящее время планируется реализовать в единой локальной информационноуправляющей системе оперативного управления робототехническими комплексами военного назначения ВМФ, применяемыми в оперативноважных районах Мирового океана. Функционирование данной системы построено на использовании автономных подвижных многофункциональных буев (АПМБ) для надежной и точной передачи информации между обеспечиваемыми робототехническими комплексами военного назначения, носителем и центрами управления такими аппаратами, для выполнения возложенных на нее функций в соответствии с заданными требованиями.

Это позволит обеспечить любому, находящемуся в зоне связи одного из элементов единой локальной информационно-управляющей системы (беспилотному летательному аппарату, морскому робототехническому комплексу военного назначения, кораблю или подводной лодке), снабженных соответствующей абонентской аппаратурой связи, доступ ко всей информации об обстановке в том числе по запросу. Воздушные и надводные средства такая система позволит обеспечивать на дальностях до 30 км от АПМБ. При этом следует учитывать, что с увеличением расстояния существенно падает скорость передачи данных. Передачу больших объемов информации между АПМБ и потребителем с использованием существующих серийно выпускающихся радиомодемов возможно обеспечить на дальностях менее 10 км.

При этом существует ряд проблем, связанных с технической реализацией обмена информацией в подводном пространстве. Обеспечение ретрансляции информации между центрами управления робототехническими комплексами военного назначения и самими аппаратами реализовано на скоростях обмена данными, не позволяющими производить взаимодействие с аппаратами, получать оперативную информацию об окружающей обстановке в районе действия сил в режиме времени, близком к реальному.

Однако существующие способы передачи данных не соответствуют в полной мере предъявля-

емым требованиям к ретрансляции сравнительно больших объемов данных (например, фото или видеоинформации) с действующих под водой аппаратов:

- электромагнитные волны с частотами, использующимися в традиционной радиосвязи, сильно ослабляются при прохождении через соленую морскую воду;
- использование радиоволн предполагает использование сложных передающих антенн больших размеров, при этом КПД таких антенн остается на низком уровне; несомненным достоинством использования радиоволн является возможность приема их практически в любой точке земного шара;
- акустические волны могут отражаться или отклоняться от поверхности воды, от дна и различных предметов, воздушных пузырьков, а также от слоистых неоднородностей подводных каналов, могут непредсказуемо усиливаться, ослабляться, искажаться или компенсироваться, и, соответственно, прием вследствие реверберации может быть нарушен;
- малая скорость и объемы данных, которые не позволяют передать всю необходимую для освещения обстановки информацию;
- возможность перехвата передаваемой информации техническими средствами разведки вероятного противника, а также возможного перехвата самих используемых автономных необитаемых беспилотных аппаратов (АНПА) и роботехнических средств.

Существующие методы ретрансляции информации не позволяют формировать единое информационное пространство между всеми силами, действующими в районе выполнения задач. Для передачи информации в водной среде используются гидроакустические модемы. Антенна такой станции излучает импульсы специальной частоты. Период следования является информационным признаком команды. Эффективная скорость передачи информации составляет 4—10 кбит/с.

Также существует проблема организации ретрансляции информации между средами (водой и воздухом). Так, кроме обеспечения передачи информации между границей двух сред еще необходимо решить проблему в согласовании передачи потоков данных, так как разброс пропускной способности каналов, систем и сетей приземного пространства, приводного слоя и подводной среды достигает 5–6 порядков.

Таким образом, возникает противоречие между возрастающей роботизацией современных сил ВМФ, что влечет за собой и разработку новых методов, моделей применения робототехнических комплексов военного назначения в различных условиях обстановки, и необходимостью формирования в районе выполнения задач единого информационного пространства между дву-

мя средами, характеризующимися значительной неоднородностью, для обеспечения сопряжения потоков передачи данных на различных скоростях.

Для решения возникших противоречий в разрабатываемой единой локальной информационно-управляющей системе для передачи информации между двумя средами предусматривается создание шлюза межсредного согласования передачи данных, который накапливает информацию, поступающую из каналов с большими скоростями, и формирует пакеты для отправки по каналам с низкими скоростями передачи данных. Кроме этого шлюз определяет степень важности поступающей информации. Так, команды управления обладают большим приоритетом, чем данные телеметрии, а данные телеметрии в свою очередь имеют более высокий приоритет над информацией, поступающей с полезной нагрузки АНПА.

В целях повышения скорости обмена информацией в подводном пространстве предлагается использовать оптические каналы передачи данных. Несмотря на явные ограничения по дальности передачи данных, необходимости разработки способа направленной передачи данных, приведенные ограничения в ряде случаев несущественны по сравнению с приростом скорости обмена информацией.

В качестве устройства, создающего оптический канал передачи данных, предлагается использовать направленный лазер. Это позволит обеспечить высокую скорость передачи больших объемов (массивов) данных (в том числе визуальную обстановку) между подводными объектами и объектами, находящимися на поверхности и в воздушном пространстве. Для использования оптического канала необходима четкая синхронизация навигационных систем подводного и летательного аппаратов. Вместе с тем такой способ обмена данных позволит оперативно доставлять необходимую информацию на пункты управления посредством единой локальной информационно-управляющей системы, принимать быстрые и обоснованные решения, позволяющие РТК ВН точно и в срок выполнить задачи по предназначению.

Сама идея передачи данных посредством оптического канала связи не нова, однако не на-

шла существенного распространения ввиду ограничений по ее применению. Для организации обмена информацией с использованием оптического канала предлагается разработать способ передачи информации между АНПА и АПМБ: рассчитать временные рамки передачи информации, оптимальные скорости перемещения, глубины и дистанции нахождения АНПА, определить оптимальную траекторию движения АНПА относительно АПМБ, оптимальную длину волны и тип лазера, способы наведения лазерного луча на АПМБ и АНПА. В целом такая организация обмена информацией по оптическому каналу в подводном пространстве позволит производить обмен информацией без прерывания выполнения миссии АНПА, увеличить объем передаваемых данных, что в конечном итоге повысит эффективность применения единой локальной информационно-управляющей системы ВМФ при обеспечении действий морских робототехнических комплексов военного назначения, в том числе и в оперативно-важных районах Мирового океана.

Библиографический список

- 1. Автономные подводные роботы в войнах будущего // Арсенал (Военно-промышленное обозрение). 2008. № 2. URL: http://www.rusarm.com/arhiv/n2_2008/avtonomnye_podvodnye_roboty_v_vojnah_bud_uwego/ (дата обращения: 25.03.2015).
- 2. *Агеев М. Д., Илларионов Г. Ю.* и др. Необитаемые подводные аппараты военного назначения. Владивосток: Дальнаука, 2005.
- 3. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М. Д. Агеев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко и др. М.: Наука, 2005.
- 4. Баулин В. А., Кондратьев А. Н. Реализация концепции «сетецентрическая война» в ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. N 6. С. 61–67.
- 5. Киселев Л. В., Ваулин Ю. В., Инзарцев А. В., Матвиенко Ю. В. Задачи навигации, управления и ориентирования в подводном пространстве. М.: Мехатроника, автоматизация, управление. № 10. 2004.

УДК 681.3267-621.833

В. А. Голубков*

кандидат технических наук, доцент

С. Ю. Мельников*

кандидат технических наук, доцент

А. Г. Федоренко*

кандидат технических наук, доцент

И.В.Елтышева*

старший преподаватель

Т. Т. Шарафудинов*

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕДУКТОРОВ

В статье исследуется влияние технологических погрешностей изготовления и сборки зубчатых зацеплений редукторов на существование участков разгона и торможения зубчатых колес. Определены оптимальные режимы работы редуктора.

Ключевые слова: зубчатое колесо, эксцентриситет, технологические погрешности, редуктор.

V. A. Golubkov*

PhD, Tech., Associate Professor

S. U. Melnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

A. G. Fedorenko*

PhD, Tech., Associate Professor

I. V. Eltisheva*

Senior Lecturer

T. T. Sharafudinov*

Senior Lecturer

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ACCURACY ASSESSMENT OF FUNCTIONING REDUCERS

The article studies the influence of technological errors in the manufacture and Assembly of gear gears on the existence of areas of acceleration and braking gears. The optimal modes of the reducer are determined.

Keywords: gear, eccentricity, technological errors, reducer.

Динамика движения валов зубчатой передачи в значительной мере определяется мгновенными значениями скорости вращения и силовыми воздействиями на зубья колеса и шестерни в местах их контакта. Указанные параметры в полной мере определяются мгновенным значением передаточного числа i_p [1–7]. Для рационального ис-

следования передаточного числа можно частоты вращения валов представить в виде сочетания гармоник m и n:

$$i = \frac{\omega_{\text{III}}}{\omega_{\text{K}}} = \frac{m}{n},\tag{1}$$

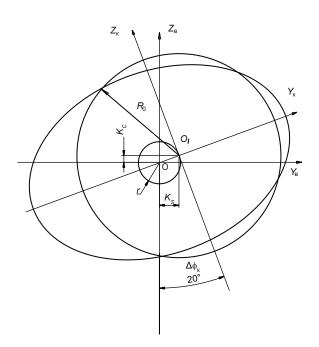
где ω_{III} и m — частота вращения и номер гармоники шестерни, ω_{K} и n — частота вращения и номер гармоники колеса.

В этом случае период процесса вращения представляется единой величиной 2π , а разница динамических процессов будет просматриваться в виде числа специфических участков обгона и торможения (положительных и отрицательных значений Δi), величиной их площадей S_i , максимальными значениями Δi на участке, формой кривой Δi на участке, разницей $\Delta \phi$ суммарных составляющих в периоде 2π положительных и отрицательных Δi :

$$\Delta \phi = \sum_{i=1}^{n} \phi_{i+} - \sum_{j=1}^{m} \phi_{j-} .$$
 (2)

Основные принципы возникновения кинематической погрешности партии редукторов пояснены на рис. 1 и рис. 2. Кинематическая погрешность венца зубчатого колеса обусловлена двумя причинами (рис. 1) [5].

Первая причина обусловлена эксцентриситетом r и образует окружность относительно центра вращения вала О. Посаженное на вал колесо имеет центр симметрии в точке О'. Оси симметрии вала $Y_{\rm B}$ и $Z_{\rm B}$ образуют угол $\Delta \varphi_{\rm K}$ с осями симметрии колеса $Y_{\rm K}$ и $Z_{\rm K}$. Вторая причина кинематической погрешности состоит в отличии формы венца зубчатого колеса от окружности. Она в большинстве случаев представляет собой овальность. В процессе сборки редуктора положение точки О' и овальность имеют бесконечное множество вариантов. Положение точки О' можно задать координатами K_S и K_C . На рис. 2 показано зацепление шестерни и колеса, выпол-



Puc. 1. Кинематическая погрешность венца зубчатого колеса

ненных с технологическими погрешностями изготовления и сборки.

При постоянном межцентровом расстоянии A сумма мгновенных радиусов шестерни $R_{\rm m}$ и колеса $R_{\rm k}$ может быть больше A, и точка касания перемещается в точку K. Имеется разница между теоретически рассчитанным радиусом $R_{\rm k}^{\rm T}$ и действительным $R_{\rm k}$, а также $R_{\rm m}^{\rm T}$ и $R_{\rm m}$ для колеса и шестерни. Различие состоит как в величине скаляра вектора, проведенного из центра вращения в точку касания, так и в его угловом положении. Поскольку величина межцентрового расстояния A и положение осей вращения О шестерни и О' колеса остается неизменным, то можно записать уравнения изменения X и Y для пары зубчатых колес в общем виде следующим образом:

$$\begin{split} X_{\text{III}} &= a \sin \left(m \phi + \Delta \phi_{\text{III}} \right) + K_{S\text{III}}; \\ Y_{\text{III}} &= b \sin \left(m \phi + \Delta \phi_{\text{III}} \right) + K_{C\text{III}}; \\ X_{\text{K}} &= c \sin \left(n \phi + \Delta \phi_{\text{K}} \right) + K_{S\text{K}}; \\ Y_{\text{K}} &= c \sin \left(n \phi + \Delta \phi_{\text{K}} \right) + K_{C\text{K}}, \end{split} \tag{3}$$

где a, b, c, d — параметры, характеризующие изменение формы венцов зубчатых колес; $K_{\rm Sm}$, $K_{\rm Cm}$, $K_{\rm Sk}$, $K_{\rm Ck}$ — параметры, характеризующие эксцентриситеты посадки колес на валы.

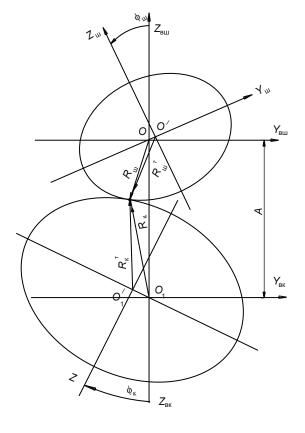


Рис. 2. Зацепление шестерни и колеса, выполненных с технологическими погрешностями изготовления и сборки

Мгновенные значения радиусов и углов их поворота могут быть представлены следующим образом [1, 3, 5]:

$$\begin{split} R_{\mathrm{III}}(\phi) &= \sqrt{X_{\mathrm{III}}^2 + Y_{\mathrm{III}}^2}; \, \phi_{\mathrm{III}}(\phi) = \mathrm{arctg} \frac{X_{\mathrm{III}}}{Y_{\mathrm{III}}}; \\ R_{\mathrm{K}}(\phi) &= \sqrt{X_{\mathrm{K}}^2 + Y_{\mathrm{K}}^2}; \, \phi_{\mathrm{K}}(\phi) = \mathrm{arctg} \frac{X_{\mathrm{K}}}{Y_{\mathrm{K}}}. \end{split} \tag{4}$$

Из полученных выражений (4) следует, что положение мгновенных $R_{\rm III}(\phi)$ и $R_{\rm K}(\phi)$ не совпадают с заданным положением углов поворота шестерни и колеса.

Передаточное отношение пары зубчатых колес может быть представлено в следующем виде [4, 6]:

$$i(\phi) = \frac{R_{\rm K}(\phi)}{R_{\rm III}(\phi)} = \frac{\sqrt{X_{\rm K}^2 + Y_{\rm K}^2}}{\sqrt{X_{\rm III}^2 + Y_{\rm III}^2}}.$$
 (5)

Анализ выражения (5) достаточно сложен, поэтому целесообразно ввести определенные допущения. Параметры a, b, c, d можно представить следующим образом:

$$\begin{split} a &= R_{\rm Om} + \Delta_{\rm \phim} \; ; \; b = R_{\rm Om} - \Delta_{\rm \phim} \; ; \\ c &= R_{\rm O_K} + \Delta_{\rm \phi_K} \; ; \; d = R_{\rm O_K} - \Delta_{\rm \phi_K} \; , \end{split}$$

где $R_{\rm Om}$ и $R_{\rm O\kappa}$ – радиусы идеальных окружностей; $\Delta_{\rm фm}$ и $\Delta_{\rm ф\kappa}$ – отклонения формы от окружности

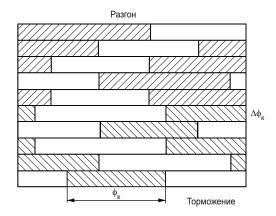
В этом случае передаточное число $i(\phi)$ принимает упрощенный вид, удобный для исследования.

$$i(\phi) = i \frac{1 - \frac{r_{\kappa}^{2}}{R_{O\kappa}^{2}} - \frac{\Delta_{\phi\kappa}}{R_{O\kappa}} \cos 2(n\phi + \Delta\phi_{\kappa}) + \frac{\Delta_{\phi\kappa} \cos 45^{\circ}}{R_{O\kappa}} \sin 2(n\phi + \Delta\phi_{\kappa} + 45^{\circ})}{1 - \frac{r_{m}^{2}}{R_{Om}^{2}} - \frac{\Delta_{\phim}}{R_{Om}} \cos 2(m\phi + \Delta\phi_{m}) + \frac{\Delta_{\phim} \cos 45^{\circ}}{R_{Om}} + \frac{\Delta_{\phim} \cos 45^{\circ}}{R_{Om}} \sin 2(m\phi + \Delta\phi_{m} + 45^{\circ})}$$
(6)

Из выражения (6) следует, что числитель и знаменатель содержат гармонические составляющие разных гармоник и поэтому их сочетание в различных парах зубчатых колес будет порождать свои специфические процессы колебания передаточных чисел в них.

Для каждой пары зубчатых колес целесообразно построить циклограмму существования длительных разгона и торможения вращения валов колес (рис. 3).

Заштрихованные участки показывают число сочетаний разгона и торможения за период вращения зубчатой пары. Число разгонов меняется



Puc. 3. Циклограмма разгона и торможения вращения валов колес

от двух до четырех. Число торможений от одного до трех. Оптимальный режим работы — одно торможение и два разгона. Наихудшие режимы работы — четыре разгона и два торможения или три разгона и три торможения. Длительные разгоны и торможения приводят к резким кратковременным скачкам для ликвидации накопленных углов кинематической погрешности. При этом возникают дополнительные перегрузки в виде ударных нагрузок.

Поэтому имитационное моделирование неравномерности частоты вращения [2, 7] в зависимости от i, $\Delta \phi_{\rm m}$ и $\Delta \phi_{\rm k}$, $r_{\rm m}$ и $r_{\rm k}$ и параметров a, b, c, d позволяет значительным образом влиять на величину $\phi_{\rm k}$ — область существования разгона и торможения, а также уменьшать общее число участков разгона и торможения. При благоприятных сочетаниях указанных выше параметров кинематическая погрешность представляет собой большое число участков с малыми накопленными углами поворота на них. Это обстоятельство существенно повышает точность и надежность работы редукторов следящих систем.

Библиографический список

- 1. Голубков В. А., Голубков А. В., Соколов Ю. Н. Анализ возникновения локальных дефектов в опорах качения сложных электромеханических систем // Завалишинские чтения. СПб.: ГУАП, 2011. С. 114–116.
- 2. Голубков В. А., Соколов Ю. Н., Федоренко А. Г., Шарафудинов Т. Т. Оптимальные режимы функционирования электромеханических систем навигации и стабилизации // Завалишинские чтения. СПб.: ГУАП, 2015. С. 83–87.
- 3. Голубков В. А., Голубков А. В., Соколов Ю. Н. Критерии оценки технического состояния электромеханических систем // Восьмая научная сессия ГУАП. Ч. 1. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2005. С. 286–288.

- 4. Голубков А. В. Локальные дефекты в опорах качения сложных электромеханических систем // Иновационные технологии в электромеханике, энергетике и системах управления (к 110-летию члена-корреспондента АН СССР Д. А. Завалишина): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2011. С. 98–101.
- 5. Ершов Д. Ю, Соколов Ю. Н. Основные аспекты обеспечения равномерности износа зубчатых механизмов в изделиях космической техники // Зубчатые передачи 98: тез. докл. Междунар. НТК по проблемам обеспечения надежности и качества зубчатых передач. СПб.: БГТУ, 1998. С. 38.
- 6. Голубков В. А., Ершов Д. Ю. Влияние направления вращения на неравномерность износа элементов конструкции привода // Перспективные материалы, технологии конструкции'99: сб. научн. тр. Всероссийской НТК. Красноярск: НИИ СУВПТ, 1999. С. 457–459.
- 7. Близневский А. С., Головенкин Е. Н., Голубков В. А. Разработка критериев диагностики при моделировании динамических процессов в электромеханических системах // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика: сб. научн. тр. Всероссийской НТК. Вып. 6. Красноярск, 2000. С. 576–578.

УДК 621.833

В. А. Голубков*

кандидат технических наук, доцент

А. Г. Федоренко*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В статье исследовано влияние начальных технических состояний элементов электромеханических устройств на условия формирования и развития локальных дефектов, приводящих к внезапным отказам. Проведен анализ влияния параметров вектора суммарного воздействия на износ элементов в отдельных точках контактирующих поверхностей.

Ключевые слова: вектор суммарного воздействия, локальные дефекты, внезапный отказ.

V. A. Golubkov*

PhD, Tech., Associate Professor

A. G. Fedorenko*

PhD, Tech., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

EVALUATION OF THE INITIAL TECHNICAL CONDITION OF ELECTROMECHANICAL DEVICES

This paper investigates the effect of initial technical conditions of electromechanical devices in terms of formation and development of local defects leading to sudden failures. The analysis of influence of parameters of the vector of total influence on wear of elements in separate points of contacting surfaces is carried out.

Keywords: vector of total impact, local defects, sudden failure.

Безотказная работа электромеханических устройств с длительным сроком активного существования в значительной степени зависит от начального технического существования при вводе в эксплуатацию. Действующие в процессе эксплуатации возмущающие факторы различной физической природы порождают условия неравномерного износа контактирующих поверхностей элементов электромеханических устройств, таких как опоры качения и зубчатые зацепления. Износ поверхностей вызывает изменение их исходной формы и порождает значительные отклонения от правильной формы, а также условия зарождения и развития локальных дефектов [1, 2]. Характер развития локальных дефектов имеет принципиальное значение для формирования условий внезапного отказа.

Характер отклонений от правильной формы (окружности для опор качения и эвольвенты для зубчатых зацеплений) зависит от концентрации суммарного возмущающего воздействия в от-

дельных точках контактирующих поверхностей. При анализе характера изменения скаляра вектора суммарного воздействия необходимо также учитывать и скорость его вращения. Выравнивание износа имеет место при однонаправленном изменении скаляра вектора и скорости его вращения. При разнонаправленном изменении имеет существенное увеличение износа в отдельных точках поверхности. При больших скоростях вращения вектора суммарного воздействия износ в единицу времени уменьшается. При малых скоростях вращения, остановках вектора и даже изменения направления вращения вызывают увеличение износа в отдельных точках и фазовых областях. Поскольку большинство возмущающих факторов имеет гармонический вид, то на характер изменения вектора возмущающего воздействия существенно влияют фазовые сдвиги составляющих гармоник.

Имитационное моделирование качества функционирования электромеханических устройств

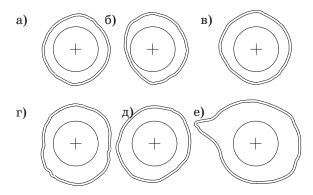


Рис. 1. Характеристики износа

позволяет оценивать начальное исходное состояние устройств.

На рис. 1, а показана картина характера износа при нулевых сдвигах фаз. При длительной эксплуатации формируется сочетание эллипса и четырехгранности. При незначительном сдвиге фаз (рис. $1, \delta$) получаем форму фасоли. Износ левой и правой частей фазового пространства различен. При увеличении сдвига фаз в пределах от 5 до 15° характер износа выравнивается (рис. 1, в). При сдвиге фаз на 180° (рис. 1, z) износ приобретает форму восьмерки. При сдвиге фаз однонаправленном на 90° имеем форму восьмерки (рис. 1, ∂). При разнонаправленном сдвиге фаз на 90° (рис. 1, e) получаем условия формирования локального дефекта. Таким образом, начальное техническое состояние существенно влияет на условия эксплуатации электромеханического устройства и его ресурс. Симметричные формы износа вызывают формирование гармоник (овальности, гранности) и улучшают условия эксплуатации. Несимметричные формы износа и области усиленного износа (локальные дефекты) существенно ухудшают условия эксплуатации и сокращают ресурс функционирования изделия. Поэтому начальное техническое состояние электромеханического устройства существенным образом определяет работу системы в целом в процессе ее эксплуатации.

Неравномерный износ контактирующих поверхностей порождает дополнительные изменения вектора суммарного воздействия. При определенных условиях возникают лавинообразные процессы развития локальных дефектов, которые приводят к резкому сокращению ресурса в результате внезапного отказа.

Библиографический список

- 1. Голубков В.А., Голубков А.В., Соколов Ю. Н. Анализ возникновения локальных дефектов в опорах качения сложных электромеханических систем // Завалишинские чтения. СПб.: ГУАП, 2011. С. 114–116.
- 2. Голубков В. А. Влияние неоднородности физико-механических свойств материалов элементов шарикоподшипников на формирование локальных дефектов // Завалишинские чтения. СПб.: ГУАП, 2010. С. 94–97.

УДК 621.3.013.7

А. А. Ефимов*

доктор технических наук, профессор

С. И. Бардинский*

кандидат технических наук, ведущий инженер

С. Ю. Мельников*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В КОНСТРУКЦИЯХ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Статья посвящена разработке упрощенной методики расчета магнитных полей, создаваемых сложной пространственной совокупностью токопроводящих устройств. Такой расчет необходим на стадии проектирования мощных электротехнических устройств, в которых основными источниками магнитных полей, создающих помехи, являются проводники с током. Методика основана на использовании закона Био – Савара и применима для расчета индукции контуров с током произвольной пространственной конфигурации. Приведен подробный алгоритм расчета индукции магнитного поля в трехмерном пространстве.

Ключевые слова: индукция, магнитное поле, закон Био – Савара, проводник с то-ком.

A. A. Efimov*

Dr. Sc., Tech., Professor

S. I. Bardinskiy*

PhD, Tech., Leading Engineer

S. Yu. Melnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ENGINEERING CALCULATION METHOD OF MAGNETIC FIELDS IN STRUCTURES OF POWER ELECTRONICS DEVICES

The article is devoted to development of the simplified method for calculation of the magnetic fields created by complex spatial set of conducting current devices. Such calculation is necessary at a design stage of powerful electrotechnical devices in which the main sources of the magnetic fields that create interference, are the current-currying wires. The technique is based on use of the Biot – Savart law allowing to calculate the induction created by any spatial configuration current-currying wires. The article contains a detailed algorithm for calculation of magnetic field induction in three-dimensional space.

Keywords: induction, magnetic field, Biot – Savart law, current-currying wire.

В настоящее время силовая электроника является наиболее динамично развивающимся научно-техническим направлением, определяющим технический прогресс в электротехнике, энергетике, электромеханике и робототехнике. Стремительное развитие силовой электроники произошло благодаря тому, что в конце XX века были созданы силовые полупроводниковые при-

боры большой мощности, отличающиеся полной управляемостью и высоким быстродействием, по своим характеристикам практически соответствующие идеальным ключам. Прогрессу в силовой электронике также способствовало развитие информационных технологий, появление специализированных сигнальных микроконтроллеров, предназначенных для управления

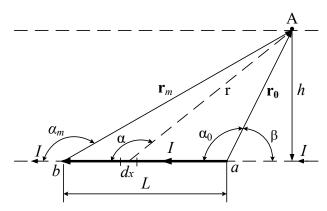


Рис. 1. Расчетная схема для определения в точке А индукции магнитного поля, созданного током, протекающим в проводнике длиной L

устройствами силовой электроники и реализации в них импульсно-модуляционных алгоритмов управления и создания цифровых систем автоматического управления.

Однако работа устройств силовой электроники в ключевых режимах работы привела к значительному возрастанию электромагнитных помех, оказывающих существенное влияние на работу микропроцессорных систем управления. Зачастую это проявлялось на этапе конструкторского проектирования устройств силовой электроники, при изготовлении опытных образцов и их испытаниях. Иногда это вызывало необходимость проведения конструктивных изменений токоведущих шин, экранирования блоков управления и даже изменения конструкции силовой части, добиваясь методом проб и ошибок нужного уменьшения магнитных полей. В результате увеличивалась стоимость разработки и создания проектируемых устройств, а также затягивались сроки их изготовления.

Все это свидетельствует о необходимости проведения предварительного расчета магнитных полей на стадии проектирования. Однако такие расчеты затруднительны в случаях, когда магнитное поле создается сложной пространственной совокупностью проводящих шин с токами. Аналитические выражения для расчета магнитного поля, создаваемого током в проводниках определенных форм, приведены в литературе [1-5]. Определение по этим выражениям магнитного поля в случае произвольной пространственной конфигурации совокупности проводников с током весьма затруднительно, поэтому потребовалось разработать упрощенную инженерную методику расчета, позволяющую решить эту задачу. Указанная методика разрабатывалась в порядке содружества для проектного отдела ОАО «Силовые машины» на кафедре электротехники и технической диагностики Государственного университета аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург).

Для ряда устройств, в которых токоведущие части можно без большой погрешности заменить линейными проводниками, оказалось целесообразным в упрощенной методике расчета использовать закон Био – Савара [6].

Методика основана на определении в любой точке A вектора магнитной индукции B_A , созданной линейным, бесконечно тонким, конечной длины проводником L с током I. На рис. 1 представлена расчетная схема, где все линейные отрезки рассматриваются как геометрические векторы. Направление вектора $\mathbf L$ совпадает с направлением тока I. Вектор $\mathbf r_0$ направлен от точки a входа тока в проводник в точку A. Вектор $\mathbf r_m$ направлен из точки B выхода тока из проводника в точку A. Угол между вектором $\mathbf L$ и $\mathbf r_0$ обозначен α_m . Расстояние между точкой A и продолжением проводника обозначено h.

Для определения индукции, созданной током в проводнике конечной длины, используется прием, применяемый для тока проводника бесконечной длины [7].

Индукция B_A в точке A, созданная конечным отрезком dx проводника aB, вычисляется интегрированием выражения закона Био — Савара

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dx \cdot \sin \alpha}{r^2};$$
 (1)

вдоль всего отрезка проводника с током от точки a до точки b:

$$B_{A} = \frac{\mu_{0}I}{4\pi} \int_{a}^{b} \frac{dx \cdot \sin \alpha}{r^{2}} = \frac{\mu_{o}I}{4\pi} \int_{\alpha_{0}}^{\alpha_{m}} \frac{\sin \alpha \cdot d\alpha}{h} =$$

$$= \frac{\mu_{0}I}{4\pi} \cdot \frac{\cos \alpha_{0} - \cos \alpha_{m}}{h}, \text{Тл.}$$
(2)

Рассмотренный метод определения индукции единичного проводника с током может быть положен в основу расчета индукции, созданной несколькими проводниками. Но так как векторы индукции разных проводников могут не совпадать в трехмерном пространстве по направлению, то для определения результирующего модуля и вектора индукции нужно суммировать векторы индукции всех проводников. При этом длина вектора каждого проводника определяется модулем, рассчитанным по полученной выше формуле (2). Направление каждого вектора можно найти, если использовать формулировку закона Био — Савара в форме векторного произведения единичных векторов е_г и е_г

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}_L \times \mathbf{e}_r, \tag{3}$$

где ${\bf E}$ — результат векторного произведения, ${\bf e}_L$ — единичный вектор, совпадающий по направлению с ${\bf L}$, а ${\bf e}_r$ — единичный вектор, совпадающий по направлению с ${\bf r}_0$.

Положительные направления L и ${\bf r}_0$ следует выбирать от точки a в направлении точек B и A

соответственно (см. рис. 1). Точка a выбирается на том конце отрезка, в который входит ток I.

Таблица 1

Операции вычисления и расчетные формулы

№ π/π	Операции вычислений	Формулы
1	Определение проекций вектора L на оси координат	$L_{X}\!\!=\!\!x_{L2}\!\!-\!\!x_{L1}, L_{Y}\!\!=\!\!y_{L2}\!\!-\!\!y_{L1}, L_{Z}\!\!=\!\!z_{L2}\!\!-\!\!z_{L1}$
2	Расчет модуля вектора L	$L = \sqrt{L_X^2 + L_Y^2 + L_Z^2}$
3	Определение проекций вектора ${f r}_0$ на оси	$r_{0x} = x_A - x_{L1}, r_{0y} = y_A - y_{L1}, r_{0z} = z_A - z_{L1}$
4	${f P}$ асчет модуля вектора ${f r}_0$	$\mathbf{r}_0 = \sqrt{r_{0x}^2 + r_{0y}^2 + r_{0z}^2}$
5	Определение угла α_{θ}	$\alpha_0 = \arccos\left(\frac{L_X}{\mathbf{L}} \cdot \frac{r_{0x}}{\mathbf{r}_0} + \frac{L_Y}{\mathbf{L}} \cdot \frac{r_{0y}}{\mathbf{r}_0} + \frac{L_Z}{\mathbf{L}} \cdot \frac{r_{0z}}{\mathbf{r}_0}\right)$
6	Определение угла β_0	$\beta_0 = 180 - \alpha_0$
7	Определение перпендикуляра <i>h</i>	если $\alpha_0 \le 90^\circ, h = r_0 \cdot \sin \alpha_0$; если $\alpha_0 > 90^\circ, h = r_0 \cdot \sin \beta_0$
8	Определение проекций вектора \mathbf{r}_m	$r_{mx} = x_A - x_{L2}$, , $r_{my} = y_A - y_{L2}$, $r_{mz} = z_A - z_{L2}$
9	Расчет модуля вектора \mathbf{r}_m	$\mathbf{r}_m = \sqrt{\mathbf{r}_{mx}^2 + \mathbf{r}_{my}^2 + \mathbf{r}_{mz}^2}$
10	Вычисление $\cos lpha_m$	$\cos \alpha_m = \left(\frac{L_x}{\mathbf{L}} \cdot \frac{r_{mx}}{\mathbf{r}_m} + \frac{L_y}{\mathbf{L}} \cdot \frac{r_{my}}{\mathbf{r}_m} + \frac{L_z}{\mathbf{L}} \cdot \frac{r_{mz}}{\mathbf{r}_m}\right)$
11	Определение угла α_m	$\alpha_m = rccos lpha_m$
12	Расчет модуля индукции B_{A}	$B_A = rac{\mu_o I}{4\pi} \cdot rac{\coslpha_0 - \coslpha_m}{h}$
13	Определение проекций единичных векторов ${f e}_{f L}$ и ${f e}_{{f r}0}$	$egin{align} e_{Lx} = rac{L_x}{\mathbf{L}} \;,\; e_{Ly} = rac{L_y}{\mathbf{L}},\; e_{Lz} = rac{L_z}{\mathbf{L}}; \ e_{rx} = rac{r_{0x}}{\mathbf{r}_0},\; e_{ry} = rac{r_{0y}}{\mathbf{r}_0},\; e_{rz} = rac{r_{0z}}{\mathbf{r}_0} \ \end{aligned}$
14	Определение единичного вектора E	$\mathbf{E} = \left(e_{Ly}e_{rz} - e_{Lz}e_{ry}\right)\mathbf{i} + \left(e_{Lz}e_{rx} - e_{Lx}e_{rz}\right)\mathbf{j} + \left(e_{Lx}e_{ry} - e_{Ly}e_{rx}\right)\mathbf{k} = E_x\mathbf{i} + E_y\mathbf{j} + E_z\mathbf{k}$
15	Определение вектора \mathbf{B}_a	$\mathbf{B}_{a} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{B} \cdot E_{x} \mathbf{i} + \mathbf{B} \cdot E_{y} \mathbf{j} + \mathbf{B} \cdot E_{z} \mathbf{k} = B_{ax} \mathbf{i} + B_{ay} \mathbf{j} + B_{az} \mathbf{k}$
16	Векторы \mathbf{B}_b , \mathbf{B}_c , \mathbf{B}_d	$\mathbf{B}_b = B_{bx}\mathbf{i} + B_{by}\mathbf{j} + B_{bz}\mathbf{k}; \ \mathbf{B}_c = B_{cx}\mathbf{i} + B_{cy}\mathbf{j} + B_{cz}\mathbf{k}; \ \mathbf{B}_d = B_{dx}\mathbf{i} + B_{dy}\mathbf{j} + B_{dz}\mathbf{k}$
17	Определение вектора ${\bf B}_{pes}$, созданного совокупностью a , $B, c,, n$ проводников	$\mathbf{B}_{\text{pes}} = (B_{ax} + B_{bx} + B_{cx} + \dots + B_{nx})\mathbf{i} + (B_{ay} + B_{by} + B_{cy} + \dots + B_{ny})\mathbf{j} + (B_{az} + B_{bz} + B_{cz} + \dots + B_{nz})\mathbf{k} = B_{px}\mathbf{i} + B_{py}\mathbf{j} + B_{pz}\mathbf{k}$
18	Модуль результирующей $ \ \text{индукции} B_{pes} $	$B_{ m pes} = \sqrt{B_{px}^2 + B_{py}^2 + B_{pz}^2},$ где $B_{px} = B_{ax} + B_{bx} + B_{cx} + B_{dx};$ $B_{py} = B_{ay} + B_{by} + B_{cy} + B_{dy};$ $B_{pz} = B_{az} + B_{bz} + B_{cz} + B_{dz}$

Направление вектора \mathbf{E} можно выразить через проекции векторов $\mathbf{e_L}$ и $\mathbf{e_r}$ в прямоугольной системе координат x,y,z (например, правой) путем их векторного умножения [8]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}_{L} \times \mathbf{e}_{r} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ e_{Lx} & e_{Ly} & e_{Lz} \\ e_{rx} & e_{ry} & e_{rz} \end{vmatrix}. \tag{4}$$

Проекции векторов ${\bf e_L}$ и ${\bf e_r}$ вычисляются с использованием проекций ${\bf L}$ и ${\bf r_0}$ на оси, деленных на длины L и r_o соответственно:

$$e_{Lx} = \frac{L_x}{L}, \ e_{Ly} = \frac{L_y}{L}, \ e_{Lz} = \frac{L_Z}{L},$$

$$e_{rx} = \frac{r_x}{r_o}, e_{ry} = \frac{r_y}{r_o}, e_{rz} = \frac{r_z}{r_o}.$$
 (5)

При вычислении проекций необходимо обратить внимание на получение правильного знака проекции. Знак зависит от взаимных направлений вектора и оси координат. При встречных направлениях знак отрицательный. Знак минус получается автоматически, если координата начала вектора x_1 больше координаты конца x_2 (стрелки). Например, если $x_{L1} > x_{L2}$ проекция $L_X = x_{L2} - x_{L1}$ отрицательна.

Раскрыв определитель (4), получим:

$$\begin{split} \mathbf{E} = & (e_{Ly}.e_{rz} - e_{Lz}.e_{ry})\mathbf{i} + (e_{Lz}.e_{rx} - e_{Lx}.e_{rz})\mathbf{j} + \\ & + (e_{Lx}.e_{ry} - e_{Ly}.e_{rx})\mathbf{k} = & \mathbf{E}_x\mathbf{i} + & \mathbf{E}_y\mathbf{j} + & \mathbf{E}_z\mathbf{k}. \end{split} \tag{6}$$

Вектор магнитной индукции равен произведению модуля индукции B на вектор \mathbf{E} :

$$\mathbf{B} = B \cdot \mathbf{E} = B \cdot E_x \mathbf{i} + B \cdot E_y \mathbf{j} + B \cdot E_z \mathbf{k} = B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k}.$$
 (7)

Результирующий вектор получается суммированием векторов индукции всех проводников a, B и т. д. модели устройства:

$$\mathbf{B}_{\text{pes}} = (\mathbf{B}_{ax} + \mathbf{B}_{bx} + \cdots)\mathbf{i} + (\mathbf{B}_{ay} + \mathbf{B}_{by} + \cdots)\mathbf{j} + (\mathbf{B}_{az} + \mathbf{B}_{bz} + \cdots)\mathbf{k} = \mathbf{B}_{px}\mathbf{i} + \mathbf{B}_{py}\mathbf{j} + \mathbf{B}_{pz}\mathbf{k}.$$
 (8)

Модуль результирующей индукции:

$$B_{pes} = \sqrt{B_{px}^2 + B_{py}^2 + B_{pz}^2}.$$
 (9)

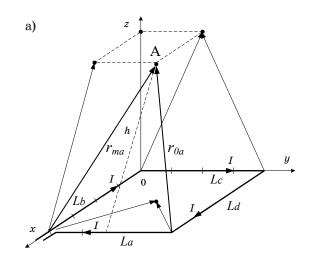
Для расчета индукции по предложенной методике необходимы следующие исходные данные:

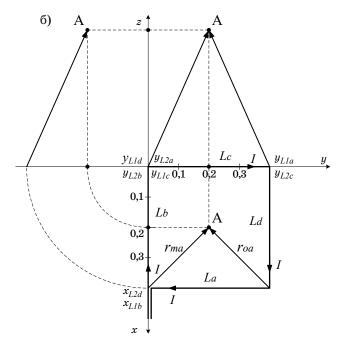
- 1. Чертеж расчетной модели оригинала устройства проводников с токами в декартовой системе координат x, y, z.
- 2. Для каждого проводника координаты его концов $x_{I,1}$ $x_{I,2}$; $y_{I,1}$ $y_{I,2}$; $z_{I,1}$ $z_{I,2}$.
- концов $x_{L1,}$ x_{L2} ; $y_{L1,}$ y_{L2} ; $z_{L1,}$ z_{L2} . 3. Координаты точки A, в которой определяется вектор индукции $x_{A,}$ $y_{A,}$ $z_{A.}$
- 4. Величина и направление тока (постоянного или однофазного переменного) в каждом проводнике.

Порядок вычислений приведен в табл. 1.

Достоверность предложенной методики определения индукции магнитного поля, созданного токами линейных проводников ограниченной длины, можно подтвердить, сравнив результаты расчета по известной формуле для кругового контура с расчетом по предлагаемой методике для равного по площади многоугольника, например квадрата.

На оси квадратного контура со сторонами L=0,4 м и током в проводниках I=100 А в точке A на расстоянии h=0,8 м от проводников a,B,c и d по описанной выше методике определяется вектор результирующей индукции $\mathbf{B}_{\mathrm{pes}}$ (рис. 2).





 $Puc.\ 2.\ Oбъемное$ изображение расчетных векторов c их проекциями на координатные плоскости (a) и чертеж для определения координат концов расчетных векторов для проводника L_a c током (b)

Расчет индукции квадратного контура с током

Исходные данные для проводника «a»: – координаты концов проводника: x_{L1} =4, x_{L2} =4, y_{L1} =0,4, y_{L2} =0, z_{L1} =0, z_{L2} =0;

- ток I=100 A (направление тока указано на рис. 2);

– координаты точки А: x_A =0,2, y_A =0,2, z_A =0,8. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Примечание: векторы индукции проводников B, c, d, приведенные в п. 16 табл. 2, вычислялись

Таблица 2

Результаты расчета

№ п/п	Операции	Вычисления		
1	Проекции вектора L на оси	$L_x = 0 - 0 = 0; L_y = 0 - 0, 4 = -0, 4; L_z = 0 - 0 = 0$		
2	Модуль вектора L	$L = \sqrt{0^2 + (-0,4)^2 + 0^2} = 0,4$		
3	Проекции вектора ${f r}_0$ на оси	$r_{0x} = 0.2 - 0.4 = -0.2; r_{0y} = 0.2 - 0.4 = -0.2; r_{0z} = 0.8 - 0 = 0.8$		
4	Модуль вектора ${f r}_0$	$r_0 = \sqrt{(-0.2)^2 + (-0.2)^2 + 0.8^2} = \sqrt{0.72} = 0.848$		
5	Угол $ \alpha_0 $	$\alpha_0 = \arccos\left(\frac{0}{0.4} \cdot \frac{-0.2}{0.848} + \frac{-0.4}{0.4} \cdot \frac{-0.2}{0.848} + \frac{0}{0.4} \cdot \frac{0.8}{0.848}\right) = \arccos0.236 = 76.4^{\circ}$		
6	Угол β_0	$\beta_0 = 180 - \alpha_0 = 180 - 76, 4^o = 103, 6^o$		
7	Перпендикуляр <i>h</i>	$lpha_0 < 90^0$, поэтому $h = 0.848 \cdot \sin 76.4 = 0.824$		
8	Π роекции вектора \mathbf{r}_m на оси	$r_{mx} = 0,2-0,4=-0,2; r_{my} = 0,2-0=0.2; r_{mz} = 0,8-0=0.8$		
9	Модуль вектора ${f r}_m$	$r_m = \sqrt{\left(-0,2\right)^2 + 0,2^2 + 0,8^2} = \sqrt{0,72} = 0,848$		
10	$\operatorname{Pacчet} \cos lpha_m$	$\cos \alpha_m = \left(\frac{0}{0.4} \cdot \frac{-0.2}{0.848} + \frac{-0.4}{0.4} \cdot \frac{0.2}{0.848} + \frac{0}{0.4} \cdot \frac{0.8}{0.848}\right) = -0.236$		
11	Расчет угла α_m	$\alpha_m = \arccos(-0,236) = 103,6^0$		
12	${ m P}$ асчет модуля B_A	$B_A = 100 \cdot 10^{-7} \frac{-(-0,236) + 0,236}{0,824} = 5,73 \cdot 10^{-6},$ T π		
13	Проекции $\mathbf{e_L}$ и $\mathbf{e_{r0}}$ на оси	$e_{Lx}=rac{0}{0,4}=0;\;e_{Ly}=rac{-0,4}{0,4}=-1;\;e_{Lz}=rac{0}{0,4}=0; \ e_{rx}=rac{-0,2}{0,848}=-0,236;\;e_{ry}=rac{-0,2}{0,848}=-0,236;\;e_{rz}=rac{0,8}{0,848}=0,944$		
14	Расчет вектора Е	$E = [(-1) \cdot 0,944 - 0 \cdot (-0,236)]i + [0 \cdot (-0,236) - 0 \cdot 0,944]j + \\ + [0 \cdot (-0,236) - (-1)(-0,236)]k = -0,934$		
15	Вектор \mathbf{B}_a индукции проводника a	$\mathbf{B}_{a} = (5,73 \cdot 10^{-6}) [(-0,934)_{x} \mathbf{i} + (-0,236)_{z} \mathbf{k}] =$ $= (-5,34) \cdot 10^{-6} \mathbf{i} + (-1,35) \cdot 10^{-6} \mathbf{k}$		
16	Векторы $\mathbf{B}_b, \mathbf{B}_c, \mathbf{B}_d$	$\mathbf{B}_b = (-5,34) \cdot 10^{-6} \mathbf{j} + (-1,35) \cdot 10^{-6} \mathbf{k}; \ \mathbf{B}_c = (5,34) \cdot 10^{-6} \mathbf{i} + (-1,35) \cdot 10^{-6} \mathbf{k}; \\ \mathbf{B}_d = (5,34) \cdot 10^{-6} \mathbf{j} + (-1,35) \cdot 10^{-6} \mathbf{k}$		
17	Вектор $\mathbf{B}_{ ext{pe}3}$	$\mathbf{B_{pes}} = \mathbf{B}_a + \mathbf{B}_b + \mathbf{B}_c + \mathbf{B}_d = 4 \cdot (-1,35) \cdot 10^{-6} \mathbf{k} = (-5,4) \cdot 10^{-6} \mathbf{k}, \mathrm{T}$ л		
18	Модуль индукции $B_{ m pes}$	$B_{\text{pes}} = \sqrt{\left(-5, 4\cdot10^{-6}\right)^2} = 5, 4\cdot10^{-6}, \text{ Тл}$		

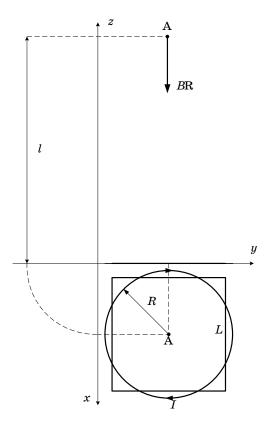


Рис. 3. Чертеж для определения индукции кругового контура

по той же методике, поэтому ввиду симметрии эти расчеты не приведены.

Расчет индукции кругового контура

На рис. 3 представлен чертеж кругового контура в виде кольца с током I=100 A.

Радиус кольца, который равновелик по площади квадрату со стороной L=0,4 м, равен

$$R = \sqrt{\frac{L^2}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.4^2}{\pi}} = 0.227 \,\mathrm{m}$$

и равновеликого ему по площади квадратного контура с током.

Модуль индукции B_R определялся на расстоянии l=0,8 по оси круга по формуле [8]:

$$B_R = rac{\mu_o I}{2} \cdot rac{R^2}{\left(R^2 + l^2
ight)^{rac{3}{2}}} = rac{\mu_0 I}{2} \cdot rac{R^2}{\left(R^2 + l^2
ight)^{rac{3}{2}}} = = = 2\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 rac{0.227^2}{\left(0.227^2 + 0.8^2
ight)^{rac{3}{2}}} = 5.5 \cdot 10^{-6} \, \mathrm{T}$$
л.

$$=2\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \frac{0.227^2}{\left(0.227^2 + 0.8^2\right)^{3/2}} = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ Tm.}$$

Погрешность вычисления индукции при сопоставлении результатов расчета обоими методами менее 5% и объясняется разной формой кон-

Предложенная инженерная методика может быть использована для расчета индукции магнитного поля, создаваемого токами сложной пространственной совокупности проводников конечной длины, в широком спектре устройств силовой электроники.

Библиографический список

- 1. Кирпанёв А. В., Лавров В. Я. Электромагнитное поле: теория идентификации и ее применение. М.: Вузовская книга, 2002. 280 с.
- 2. Standart Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., 1995. Pp. 21-22.
- 3. Charitat and Graner. About the magnetic field of a finite wire // European Journal of Physics. 2003. 24(1). Pp. 1-4.
- 4. Krishna Chaudhary. Magnetisc Field Strenght Due to Various types of Conductor. Electronics tutorials. 2017, January, 1 (URL: www.electronicspani.com).
- 5. Jose A. Miranda. Magnetic field calculation for arbitrarily shaped planar wires // American Journal of Physics. 68(3): 2000, March. Pp. 254-258.
- 6. Брунов Л. М. и др. Теория электромагнитного поля. М.: Госэнергоиздат, 1962.
- 7. Джанколи Д. Физика: в 2 т / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 660 с.
- 8. Кочин Н. Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления: 9-е изд. М.: Наука, 1965. 400 c.

УДК 62-83:621.314:621.382

А. А. Ефимов

доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ ТОКА

Для трехфазного мостового активного выпрямителя тока разработаны две функциональные схемы систем автоматического регулирования с релейным управлением в скользящем режиме. Для них были созданы в среде MatLab/Simulink моделирующие программы, позволяющие анализировать динамические показатели работы систем автоматического регулирования активного выпрямителя тока. Представлены результаты математического моделирования, по которым было проведено сравнение анализируемых алгоритмов и систем автоматического регулирования.

Ключевые слова: активный выпрямитель тока, алгоритмы управления, релейное управление, скользящие режимы, математическое моделирование.

A. A. Efimov

Dr. Sc., Tech., Professor

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RELAY CONTROL SYSTEMS FOR ACTIVE CURRENT RECTIFIERS

For three-phase bridge active current rectifier two functional schemes of automatic control systems with relay control in sliding mode designed. For them the MatLab/Simulink simulation tool that allows to analyze dynamic performance of operation for active current rectifier automatic control systems has been created. Results of mathematical modeling are presented in which a comparison analyzing algorithms and automatic control systems was held.

Keywords: active current rectifier, control algorithms, relay control, sliding modes, mathematical modeling.

Стремительное развитие силовой электроники, резкое увеличение мощности полупроводниковых преобразователей энергии оказывают заметное влияние этих устройств на показатели качества напряжений питающей сети. Широко применяемые преобразовательные устройства, в основной массе своей тиристорные преобразователи с импульсно-фазовым управлением, являются нелинейными приемниками электрической энергии, потребляющими значительную реактивную мощность, зависящую от угла фазового отпирания вентилей. Поэтому в настоящее время одним из важнейших факторов, влияющих на экономичность использования электрической энергии, является сокращение потребляемой полупроводниковыми преобразователями и электромеханическими системами на их основе (электроприводами и системами генерирования электроэнергии) реактивной мощности.

Помимо увеличения потребления реактивной мощности, полупроводниковые преобразователи создают еще весьма нежелательную мощность искажения, обусловленную несинусоидальной

формой потребляемого (рекуперируемого) тока. Наличие реактивной мощности и мощности искажения снижает коэффициент мощности преобразовательного устройства иногда до очень низких, недопустимых значений. Другим немаловажным фактором в любом преобразовательном устройстве при его работе в электромеханической системе, влияющим на ее энергетические показатели, является возможность рекуперации энергии в питающую сеть при необходимости и целесообразности этого режима.

При этом возможность рекуперации энергии в питающую сеть в системах электропривода обеспечивает экономичное и интенсивное торможение, повышая экономичность всего электропривода. В системах генерирования электроэнергии (например, авиационных) обращенный режим работы полупроводникового преобразователя обеспечивает возможность электростартерного запуска авиационного двигателя. Поэтому возрастающие масштабы использования полупроводниковых преобразователей различных типов, а также электромеханических систем на

их основе настоятельно требуют разработки методов и устройств, повышающих их энергетические показатели. Наиболее перспективной возможностью обеспечения энергосбережения и повышения экономичности использования электрической энергии в полупроводниковых преобразователях систем генерирования электроэнергии и регулируемых электроприводов как постоянного, так и переменного тока является повышение качества электропотребления [1].

Это повышение возможно обеспечить даже при использовании простейших силовых схем полупроводниковых преобразователей (с учетом современной элементной базы устройств силовой электроники: IGBT, IGCT, MOSFET, MCT, GTO-тиристоров и других) за счет усовершенствования алгоритмов управления ключевыми преобразователями электрической энергии, путем разработки и использования релейных и импульсно-модуляционных способов управления, обеспечивающих энергетическую и электромагнитную совместимость полупроводниковых преобразователей с питающей сетью.

При выполнении схем преобразователей энергии на полностью управляемых полупроводниковых приборах, управление которыми обеспечивается релейными или импульсно-модуляционными способами, оказывается возможным активное формирование потребляемых такими преобразователями сетевых токов и режимов электропотребления из питающей сети. При этом свойство мало искажающего влияния ключевых полупроводниковых преобразователей на питающую сеть определяется не элементами высокочастотных фильтров, устанавливаемых на входе полупроводниковых преобразователей, а использованием релейных или импульсно-модуляционных способов управления ключевыми преобразователями и применением замкнутых систем автоматического регулирования (САР). Таким образом, рассматриваемые устройства, являясь исходно преобразователями энергии, за счет определенных особенностей построения и управления обеспечивают неискажающее их влияние на питающую сеть. Поэтому для определения рассматриваемых полупроводниковых преобразователей наиболее подходит термин активный преобразователь, который в последнее время часто используется в отечественной литературе.

В этом определении подчеркивается главное отличительное свойство такого преобразователя, заключающееся в том, что это преобразовательное устройство с набором характерных особенностей рассматриваемого класса устройств силовой электроники, обеспечивающее активное формирование режимов электропотребления из питающей сети. Такими особенностями, позволяющими выделить рассматриваемые полупроводниковые преобразователи в отдельный класс, являются [1]:

- 1. Тип силовых полупроводниковых приборов (у традиционных тиристорных преобразователей, которые в данном случае следует называть «пассивными», не полностью управляемые вентили, у активных полностью управляемые ключи).
- 2. Тип коммутации (у «пассивных» естественная, у активных искусственная, принудительная).
- 3. Способ управления (у «пассивных» способ импульсно-фазового управления, у активных релейные или импульсно-модуляционные способы: программная или следящая ШИМ, скользящее (разрывное) управление, а также способ прогнозирующего релейно-векторного управления).
- 4. Тип преобразователя частоты. При выполнении преобразователей частоты на полностью управляемых ключах с импульсно-модуляционными способами управления также сохраняется общепринятое их деление на двухзвенные (ДПЧ) и непосредственные (НПЧ). Но при этом, вопервых, их свойства в плане влияния на питающую сеть становятся идентичными, а во-вторых, появляется возможность создания третьего типа бесфильтровых двухзвенно-непосредственных преобразователей частоты (ДНПЧ), имеющих промежуточные свойства между НПЧ и ДПЧ.

При выполнении всех вышеперечисленных условий любой известный тип полупроводникового преобразователя (управляемые выпрямители, автономные инверторы тока или напряжения, ДПЧ, НПЧ, ДНПЧ) может рассматриваться как активный, то есть он образует вне зависимости от схемных реализаций новый класс полупроводниковых преобразователей, обладающих новыми свойствами.

Отличительные характерные свойства активных преобразователей обусловлены полной управляемостью переменных (U, I, P, Q, S) на входе полупроводниковых преобразователей, позволяющей обеспечивать одновременно с реализацией заданного качества выходных переменных активное формирование режима электропотребления полупроводниковых преобразователей из питающей сети. Такими уникальными свойствами активных преобразователей, предопределяющими их перспективное применение в электромеханических системах, являются:

- двухсторонний обмен энергией с питающей сетью при возможности реализации схем выпрямителя, инвертора, ДПЧ, НПЧ и ДНПЧ;
- практически синусоидальный сетевой ток в режимах потребления и рекуперации энергии за счет реализации релейных или импульсномодуляционных способов управления и применения замкнутых САР;
- возможность регулирования не только коэффициента искажения сетевого тока, но и коэффициента сдвига, что обеспечивает полное управление в широких пределах коэффициен-

том мощности по входу полупроводникового преобразователя и реализацию его индуктивных, емкостных и единичного значений;

- обеспечение возможности сокращения потерь энергии в процессе ее преобразования за счет оптимизации релейных или импульсно-модуляционных алгоритмов управления силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Несмотря на некоторое усложнение и силовой схемы, и системы управления, использование активных преобразователей позволяет улучшить электромагнитную совместимость электромеханических систем с питающей сетью и унифицировать схемные решения. Усложнение управляющей части активных преобразователей не столь существенно при условии, что вновь разрабатываемые системы генерирования электроэнергии и электропривода, как правило, создаются с системами прямого микропроцессорного управления, в которых сложность реализации алгоритмов управления достигается за счет усложнения только программного обеспечения. При этом активные преобразователи обеспечивают формирование синусоидальных токов в своих входных и выходных цепях.

Вопросам исследования режимов работы активных преобразователей, изучения их свойств и возможностей, построения замкнутых САР, а также применения в различных электромеханических системах, как у нас в стране, так и за рубежом, уделялось и уделяется значительное внимание. Однако наиболее широко представлены работы, в которых анализируются принцип построения, математическое описание и системы управления активных преобразователей напряжения, работающих в режимах активного

выпрямителя напряжения и сетевого инвертора напряжения, а также электромеханических систем на их основе. Вопросы построения активных преобразователей, работающих в режиме источника тока (активных выпрямителей тока – (АВТ), а также сетевых инверторов тока – (СИТ), изучения их свойств, математического описания и синтеза систем управления), разработаны в меньшей степени [1–9]. И только в последние годы внимание к этим преобразователям существенно возросло [10–15].

Целью данной работы является представление алгоритма релейного управления в скользящем режиме трехфазным АВТ, а также синтез и сравнение между собой двух вариантов его САР, одна из которых наряду с релейным регулятором сетевых токов содержит ПИ-регулятор выпрямленного тока, вторая — реализует полностью разрывный алгоритм управления в скользящем режиме как сетевыми, так и выпрямленным токами.

Функциональная схема САР, реализующая релейный регулятор сетевых токов (РРСТ), работающий в скользящем режиме, и ПИ-регулятор выпрямленного тока (РВТ) трехфазного мостового АВТ, представлена на рис. 1.

В силовой схеме АВТ, представленной на рис. 1, блок полупроводникового коммутатора (ПК) представляет собой трехфазную мостовую схему выпрямления, реализованную на полностью управляемых ключах с односторонней токовой проводимостью. Каждый ключ реализован либо на GTO-тиристорах, либо на IGВ-транзисторах с последовательно включенным диодом. Силовой схеме АВТ соответствует его схема замещения, изображенная на рис. 2 [1–4]. Помимо ПК, в его состав входит трехфазный се-

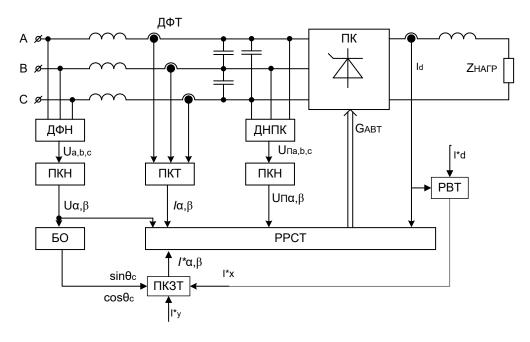


Рис. 1. Функциональная схема CAP ABT с релейным регулятором сетевых токов (PPCT) и ПИ-регулятором выпрямленного тока (PBT)

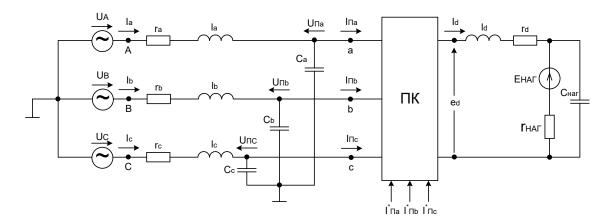


Рис. 2. Схема замещения АВТ

тевой фильтр с параметрами r_i , l_i , C_i (i=a, b, c), емкости которого преобразованы в эквивалентную звезду, а также индуктивный фильтр выпрямленного тока (l_d). Нагрузка представлена активным сопротивлением $r_{\rm Har}$ и противо-ЭДС $E_{\rm Har}$ с емкостью $C_{\rm Har}$. Питается ABT от трехфазной симметричной сети с напряжением 220/380 В, частота которого равна 50 Гц.

Условно-положительные направления токов соответствуют режиму работы схемы в качестве выпрямителя и отражают процесс преобразования энергии сети переменного тока в энергию постоянного тока.

В трехфазной мостовой схеме ABT существует всего девять состояний, когда ток проводят только два ключа (один в анодной, другой в катодной группе). Нумерация ключей стандартная (1, 3, 5- в катодной и 4, 6, 2- в анодной группах). В зависимости от комбинации замкнутых ключей существует шесть ненулевых образующих (пространственных) векторов тока неиз-

менной амплитуды, равной $I = \frac{2}{\sqrt{3}} i_d$ и с фазовы-

ми углами Θ_i , принимающими в неподвижной системе координат (α, β) дискретные значения:

$$\Theta_i = (2i-1)\frac{\pi}{6}$$
, где $i=1...6$ — номер сектора, как

это изображено на рис. 3 [1, 2, 3].

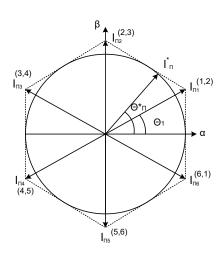
Кроме того, в трехфазном ABT существуют три нулевых образующих вектора сетевого тока, характеризующих одновременную проводимость ключей в одном из плеч ПК и соответствующих началу координат. Отсчет секторов начинается от вещественной оси (α) . Их номера совпадают с индексом (номером) образующего вектора тока, расположенного в конце соответствующего сектора. Номера проводящих ключей у образующих векторов показаны в круглых скобках.

В алгоритме векторной ШИМ АВТ [2, 3] среднее за период ШИМ значение вектора тока на

входе ПК, равное модулю вектора задания $\mathbf{I}_{\mathrm{n}}^*$, получается за счет использования двух ненулевых и одного нулевого образующих векторов, наиболее близких к требуемому среднему значению тока. В алгоритмах разрывного и прогнозирующего релейно-векторного управления [5–9] на интервале дискретизации (Δt), который также называется интервалом управления, реализуется только одно значение образующего вектора. Выбор необходимого для реализации образующего вектора в каждом из алгоритмов осуществляется по-разному, на основании своих правил.

Суть метода релейного управления [5, 8, 9] заключается в создании скользящего режима по границе поверхностей разрыва, заданных уравнениями S_{α} =0, S_{β} =0. Функции S_{j} ($j=\alpha,\beta$) зависят от порядка системы и, в частности для LC-фильтра, имеющего второй порядок, определяются как линейная комбинация ошибки управления и ее производной. При возникновении скользящего режима координата ошибки стремится к нулю с постоянной времени τ .

При этом основная задача синтезируемого релейного регулятора заключается в установлении



Puc.~3.~Beктор задания $\mathbf{I}_n^{~*}$ и образующие векторы $\mathbf{I}_{n(\kappa)}$ (κ =1,2,..,6) ABT

такой последовательности переключения силовых ключей ПК, при которой потребляемые из сети токи были бы близки к синусоидальным. Регулирование осуществляется в неподвижной системе координат (α,β) .

Поверхность скольжения выражается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} S(e_{\alpha}, e_{\Theta_{\alpha}}, t) = e_{\alpha} + \tau_{\alpha} \cdot \frac{de_{\Theta_{\alpha}}}{dt} = 0 \\ S(e_{\beta}, e_{\Theta_{\beta}}, t) = e_{\beta} + \tau_{\beta} \cdot \frac{de_{\Theta_{\beta}}}{dt} = 0 \end{cases}$$
(1)

где $e_{\alpha}=i_{\alpha}^{*}-i_{\alpha},\ e_{\beta}=i_{\beta}^{*}-i_{\beta},\ e_{\Theta_{\alpha}}=\Theta_{\alpha}^{*}-\Theta_{\alpha},$ $e_{\Theta_{\beta}}=\Theta_{\beta}^{*}-\Theta_{\beta}\quad\text{ошибки по проекциям тока и их производным; }\tau_{\alpha},\tau_{\beta}\quad\text{параметры, зависящие от постоянной времени желаемой реакции входных токов }(\tau_{\alpha}>0,\tau_{\beta}>0)$ и определяющие скорость затухания переходного процесса в скользящем режиме, $\tau_{\alpha}=\tau_{\beta}=\tau=0,0001$ с. [8, 9]. Однако для сопоставимого быстродействия обоих алгоритмов, рассматриваемых в работе, как это будет показано ниже, величина этого коэффициента должна быть равной 0,01 с. Для моделирования выбрано среднее значение $\tau=0,001$ с.

На практике производную токов можно определить, зная напряжение на индуктивности, тогда выражение (1) преобразуется следующим образом:

$$\begin{cases} S(e_{\alpha}, e_{\Theta_{\alpha}}, t) = (i_{\alpha}^{*} - i_{\alpha}) + \\ +\tau_{\alpha} \left(\frac{di_{\alpha}^{*}}{dt} - \frac{u_{\alpha} - r_{\Phi}i_{\alpha} - u_{n\alpha}}{l_{\Phi}}\right) = 0 \\ S(e_{\beta}, e_{\Theta_{\beta}}, t) = (i_{\beta}^{*} - i_{\beta}) + \\ +\tau_{\beta} \left(\frac{di_{\beta}^{*}}{dt} - \frac{u_{\beta} - r_{\Phi}i_{\beta} - u_{n\beta}}{l_{\Phi}}\right) = 0 \end{cases}$$

$$(2)$$

Учитывая, что задания на токи являются гармоническими сигналами, сдвинутыми между собой на 90° , система уравнений (2) принимает следующий вид:

$$\begin{cases}
S(e_{\alpha}, e_{\Theta_{\alpha}}, t) = \\
= (i_{\alpha}^{*} - i_{\alpha}) + \tau_{\alpha} \left(-\omega i_{\alpha}^{*} - \frac{u_{\alpha} - r_{\Phi} i_{\alpha} - u_{n\alpha}}{l_{\Phi}} \right) = 0 \\
S(e_{\beta}, e_{\Theta_{\beta}}, t) = \\
= (i_{\beta}^{*} - i_{\beta}) + \tau_{\beta} \left(\omega i_{\beta}^{*} - \frac{u_{\beta} - r_{\Phi} i_{\beta} - u_{n\beta}}{l_{\Phi}} \right) = 0
\end{cases}$$
(3)

Для определения порядка включения силовых ключей используется следующее правило [8, 9]:

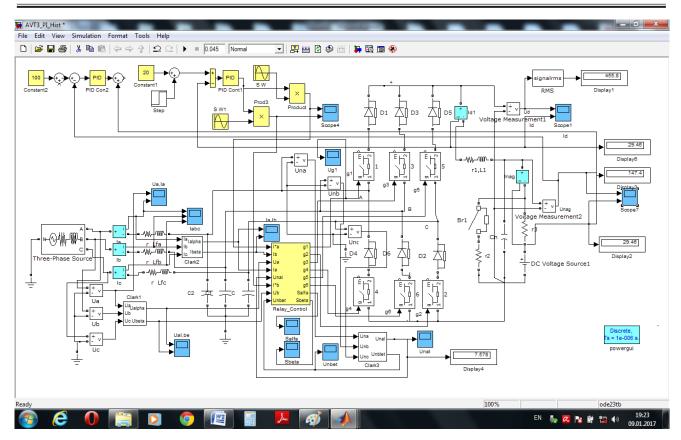
- если $S_{\alpha}\!>\!0$, то надо включить такие ключи, чтобы i_{α} увеличивался;
- если $S_{lpha}\!<\!0$, то надо включить такие ключи, чтоб i_{lpha} уменьшался;
- -если $S_{eta}\!>\!0$, надо включить такие ключи, чтоб i_{eta} увеличивался;
- если S_{eta} <0, то надо включить такие ключи, чтоб i_{eta} уменьшался.

Данный набор правил, который образует алгоритм функционирования релейного регулятора сетевых токов (алгоритм релейного векторного управления), можно представить табл. 1, где указаны номер образующего вектора и номера ключей ABT, которые необходимо включать в зависимости от номера сектора, в котором находится задающий вектор сетевого тока, и значений функций S_{α} и S_{β} , рассчитанных на текущем интервале управления.

Для реализации данного алгоритма работы в состав САР АВТ входят следующие датчики и блоки, представленные на рис. 1. Напряжения сети и на входе ПК измеряются датчиками фазных напряжений (ДФН) и датчиками напряжений полупроводникового коммутатора (ДНПК), а фазные токи – датчиками фазных токов (ДФТ).

 $\label{eq:Tadinu} {\it Tadinu} \mbox{\it u} \mbox{\it 1}$ Выбор образующего вектора по номеру сектора и знаку $S_{\alpha}\,$ и $S_{\beta}\,$

№ сектора	S_{α}	S_{eta}	Вектор/ ключи	№ сектора	S_{lpha}	S_{eta}	Вектор/ ключи
	<0	<0	4/4,5	4	<0	<0	4/4,5
1	<0	>0	3/3,4		<0	>0	3/3,4
1	>0	<0	6/6,1		>0	<0	6/6,1
	>0	>0	1/1,2		>0	>0	1/1,2
	<0	<0	4/4,5	5	<0	<0	4/4,5
2	<0	>0	2/2,3		<0	>0	2/2,3
2	>0	<0	5/5,6		>0	<0	5/5,6
	>0	>0	1/1,2		>0	>0	1/1,2
	<0	<0	5/5,6	6	<0	<0	5/5,6
3	<0	>0	3/3,4		<0	>0	3/3,4
9	>0	<0	6/6,1		>0	<0	6/6,1
	>0	>0	2/2,3		>0	>0	2/2,3



Puc. 4. Схема моделирования в среде MatLab/Simulink CAP ABT с PPCT и ПИ-РВТ

Измеренные переменные с помощью двух преобразователей координат напряжений (ПКН) и преобразователя координат тока (ПКТ) преобразуются в двухфазную неподвижную координатную систему (α , β). Блок ориентации (БО) вычисляет направляющие синус и косинус вектора сетевого напряжения. В данной САР этот блок реализуется наиболее просто, так как при необходимости поддержания единичного коэффициента сдвига между сетевыми фазными напряжениями и фазными токами направляющие косинус и синус (\cos_c и \sin_c) этого блока совпадают по фазе с фазным сетевым напряжением фазы A и ортогональным ему напряжением.

При необходимости регулирования коэффициента сдвига меняются в требуемых пределах фазы направляющего косинуса и синуса, информация о которых поступает на блок преобразователя координат задающего тока (ПКЗТ), на вход которого также поступают задающий сигнал активного тока I_x^* и реактивного тока I_y^* . С выхода этого блока на вход релейного регулятора сетевого тока (РРСТ) поступают управляющие (задающие) сигналы (i_{lpha}^{*} и i_{eta}^{*}). PPCT реализует алгоритм релейного векторного управления сетевыми токами. Задающий сигнал активного тока формируется на выходе ПИ-регулятора выпрямленного тока (РВТ), настроенного на симметричный оптимум. Задающий сигнал реактивного тока в блоке ПКЗТ задает фазовый сдвиг между сетевыми напряжениями и токами.

Для рассмотренной выше функциональной схемы САР АВТ была реализована соответствующая схема моделирования в среде MatLab/Simulink, представленная на рис. 4.

Моделирование осуществлялось при следующих параметрах: фазное напряжение U_c = 220 В, частота f=50 Γ ц, параметры сетевого фильтра: r_i =0,057 Ом, l_i =0,003 Γ н, C_i =14,1 мкФ (звезда), (i=a, b, c). Параметры выходного дросселя: l_d =0,037 Γ н, r_d =0,32 Γ 0, $r_{\rm Har}$ =10 $r_{\rm Ha$

Моделировался режим уменьшения сопротивления нагрузки в два раза в момент времени t=0,015 с и увеличения в момент времени t=0,03 с задающего сигнала на величину выпрямленного тока I_d * с 20 A до 30 A. Пропорциональная составляющая ПИ-регулятора выпрямленного тока Кп = 11,6, интегральная составляющая этого регулятора Ки =100.

Релейный регулятор сетевого тока, на схеме моделирования обозначенный как Relay_Control, реализован в соответствии с выражениями (3) и алгоритмом переключения ключей ABT, представленным в табл. 1. Схема реализации алгоритма работы PPCT представлена на рис. 5. Для реализации этого алгоритма работы необходима информация о номере сектора, в котором находится вектор задания (задающий вектор) \mathbf{I}_n^* . Эта информация получается с помощью блока Det_Sect, показанного на рис. 5, схема реализации которого представлена на рис. 6.

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

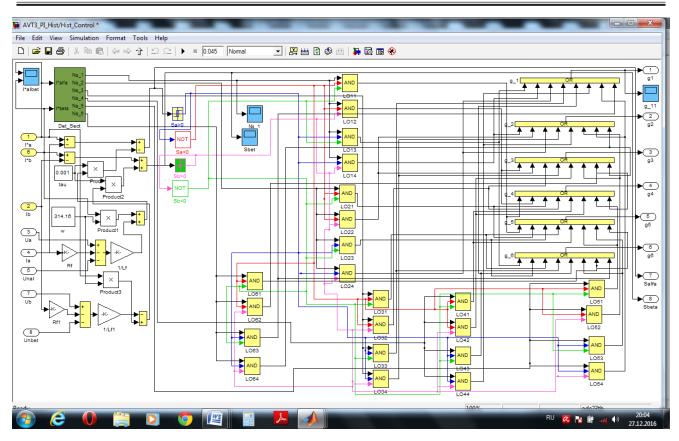
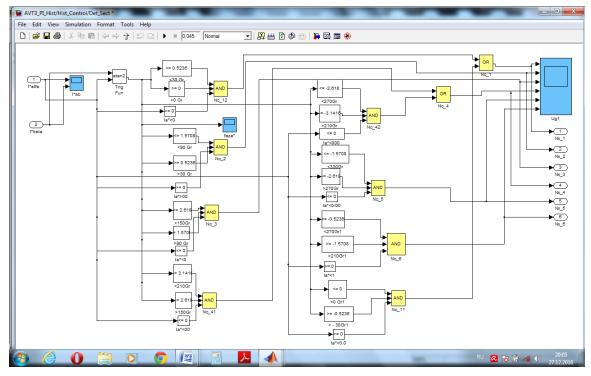


Рис. 5. Схема реализации алгоритма работы РРСТ



 $Puc.\,6.\,$ Реализация в модели блока определения сектора, в котором находится вектор задания (задающий вектор) ${I_n}^*$

Осцилограммы напряжения и тока нагрузки, полученные при моделировании, представлены на рис. 7

Сетевое фазное напряжение и ток (фазы A) представлены на рис. 8.

Из осциллограмм видно, что ток и напряжение находятся в фазе, однако воздействия по каналам управления и возмущения приводят к достаточно длительным переходным процессам в токах и напряжении нагрузки.

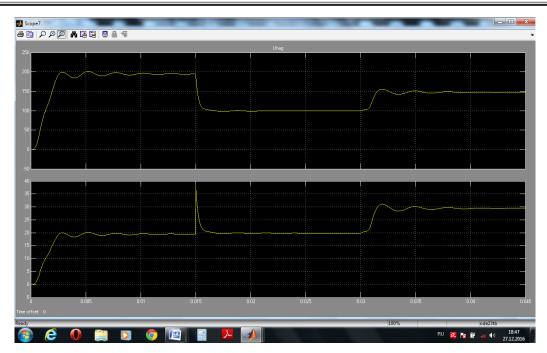


Рис. 7. Выходное напряжение и ток нагрузки с РРСТ и ПИ-регулятором

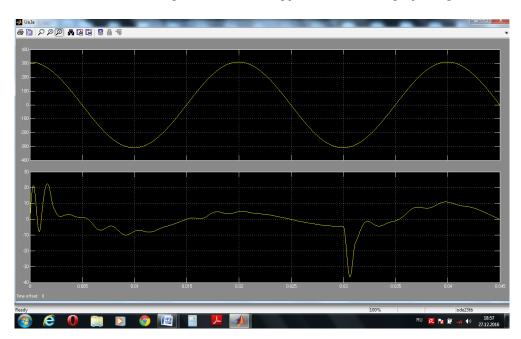


Рис. 8. Сетевое фазное напряжение и ток фазы А с РРСТ и ПИ-регулятором

Несмотря на неплохие результаты, ПИрегулятор выпрямленного тока вносит определенную инерционность, а входные и выходные токи и напряжение нагрузки имеют достаточно высокую колебательность.

Поэтому был разработан полностью разрывный алгоритм управления ABT, функциональная схема CAP для которого представлена на рис. 9.

Регулирование активной и реактивной составляющих образующего вектора сетевого тока наиболее удобно осуществлять во вращающейся синхронно и синфазно с вектором сетевого напряжения координатной системе (x, y). Поверхность скольжения при этом выражается следующими выражениями функций переключения:

$$\begin{cases} S(e_{x}, e_{\Theta_{x}}, t) = K_{d}(I_{d}^{*} - I_{d}) + K_{i}(I_{x}^{*} - I_{x}) + \\ + \tau_{x} \cdot (-\omega_{c} \cdot I_{y}^{*} - \frac{U_{x} - r_{\Phi} \cdot I_{x} - U_{nx}}{l_{\Phi}}) = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} S(e_{y}, e_{\Theta_{y}}, t) = (I_{y}^{*} - I_{y}) + \\ + \tau_{y} \cdot (\omega_{c} \cdot I_{x}^{*} - \frac{U_{y} - r_{\Phi} \cdot I_{y} - U_{ny}}{l_{\Phi}}) = 0, \end{cases}$$

$$(4)$$

где: обозначенные заглавными буквами напряжения и токи – постоянные проекции векторов этих переменных на оси координатной системы

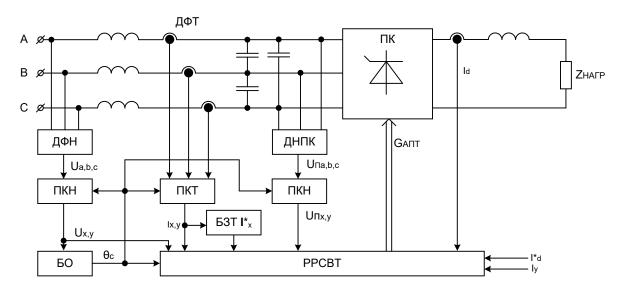


Рис. 9. Функциональная схема CAP ABT с разрывным регулятором сетевых токов и выпрямленного тока (PPCBT), работающим в скользящем режиме

(x, y); K_d и K_i — коэффициенты, определяющие степень предпочтения в регулировании выпрямленного или сетевого токов, а коэффициенты $\tau_x = \tau_y = l_{\Phi} \cdot \tau_{\alpha} = l_{\Phi} \cdot \tau_{\beta}$. Поэтому, как это было отмечено выше, для сопоставимых по быстродействию алгоритмов управления коэффициенты $\tau_x = \tau_y$ были выбраны равными 3e-5c.

Выбор образующего вектора и замыкаемых ключей ABT осуществляется в соответствии с табл. 2, сходной с аналогичной табл. 1 для релейного векторного регулятора.

Схема моделирования САР АВТ с разрывным регулятором РРСВТ в среде MatLab/Simulink представлена на рис. 10. В нее добавочно включены соответствующие преобразователи координат (Park1, Park2) и блок ориентации (Blok_Orent), определяющий угол поворота синхронно вращающейся координатной системы (Teta) относительно фазы А. Из-за отсутствия ПИ-регулятора задание на активную составляющую задающего вектора сетевого тока I_x^* формирует-

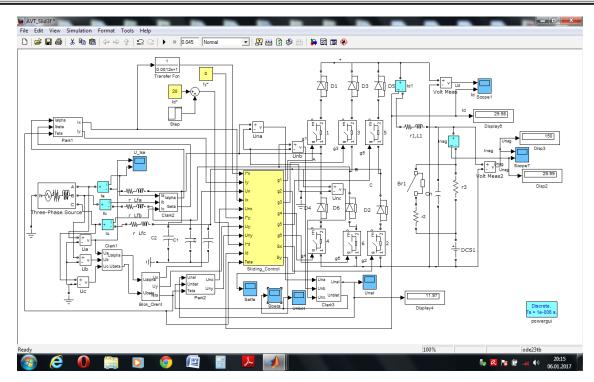
ся по текущему состоянию, то есть сетевой ток стабилизируется на уровне, который обеспечивает заданный выпрямленный ток, который пропорционален I_{x} .

Для получения его в САР включен блок задания тока (БЗТ I_x^*), в котором реализовано усреднение текущего тока I_x фильтром первого порядка с постоянной времени, равной 0,0012 с. Задание на реактивную составляющую сетевого тока установлено равным нулю, поэтому моделируется режим с единичным коэффициентом сдвига между сетевыми фазными напряжениями и токами.

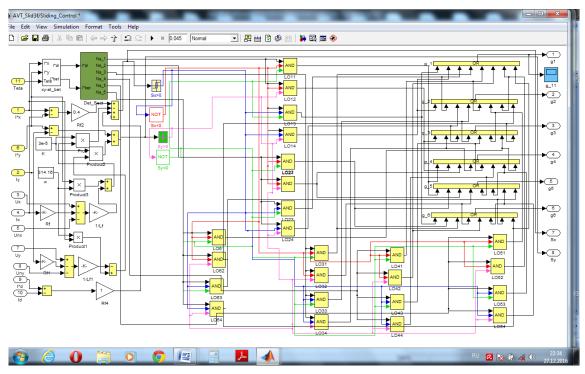
Разрывный регулятор сетевого тока и выпрямленного тока (PPCBT), на схеме моделирования обозначенный как Sliding_Control, реализован в соответствии с выражениями (4) ($K_d=1$ и $K_i=0,4$) и алгоритмом переключения ключей ABT, представленным в табл. 2. Схема реализации PPCBT представлена на рис. 11. Определитель сектора (Det Sect) полностью аналогичен

 $\label{eq:Tadhu} {\it Tadhuu} a \ 2$ Выбор образующего вектора по номеру сектора и знаку S_x и S_y

№ сектора	S_x	S_y	Вектор/ключи	№ сектора	S_x	S_y	Вектор/ключи
	<0	<0	4/4,5	4	<0	<0	1/1,2
1	<0	>0	3/3,4		<0	>0	6/6,1
1	>0	<0	6/6,1		>0	<0	3/3,4
	>0	>0	1/1,2		>0	>0	4/4,5
	<0	<0	5/5,6	5 -	<0	<0	2/2,3
2	<0	>0	4/4,5		<0	>0	1/1,2
	>0	<0	1/1,2		>0	<0	4/4,5
	>0	>0	2/2,3		>0	>0	5/5,6
	<0	<0	6/6,1	6	<0	<0	3/3,4
3	<0	>0	5/5,6		<0	>0	2/2,3
3	>0	<0	2/2,3		>0	<0	5/5,6
	>0	>0	3/3,4		>0	>0	6/6,1



Puc. 10. Схема моделирования CAP ABT с PPCBT в среде MatLab/Simulink



Puc. 11. Реализация алгоритма PPCBT (блок Sliding_Control)

предыдущему, для чего в блок Sliding_Control добавлен блок (x,y- al_bet), реализующий преобразование активной и реактивной составляющих задающего вектора сетевого тока из синхронно вращающейся координатной системы (x, y) в неподвижную систему координат (α , β).

Выходные и сетевые напряжения и токи ABT при реализации ранее анализируемых режимов работы представлены на рис. 12 и 13 соответственно.

Переходные процессы почти апериодические, их длительность 3 мс. Изменяя коэффициенты K_d и K_i в алгоритме управления (4), возможно влиять на показатели качества регулирования сетевых и выходного токов нагрузки. В установившихся режимах сетевые токи гармонические, синфазные с напряжениями питания. Изменением задания на реактивную составляющую вектора сетевых токов осуществляется регулирование коэффициента сдвига сетевых

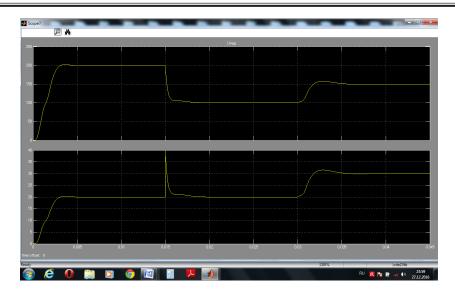


Рис. 12. Выходное напряжение и ток нагрузки с РРСВТ

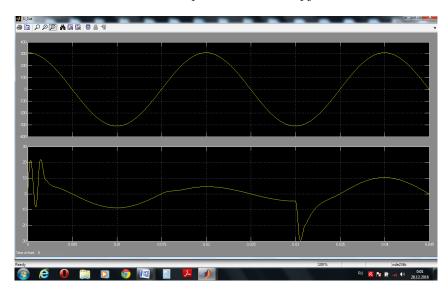


Рис. 13. Сетевое фазное напряжение и ток фазы А с РРСВТ

фазных токов и напряжений. Сравнение полученных результатов с осциллограммами, представленными на рис. 7 и 8, свидетельствует о существенных преимуществах полностью разрывного алгоритма управления АВТ.

Можно сделать следующие выводы.

- 1. Сравнение результатов моделирования двух рассмотренных в работе алгоритмов управления АВТ свидетельствует о преимуществе полностью разрывного алгоритма управления, реализующего скользящий режим.
- 2. Возможности разрывного управления АВТ в режимах высокочастотных переключений обеспечивают значительное уменьшение его реактивных элементов и его применимость как в системах электропривода, так и в системах генерирования электроэнергии автономных объектов, требующих наиболее существенного снижения их массогабаритных показателей.
- 3. АВТ может успешно применяться для модернизации традиционных тиристорных элек-

троприводов постоянного тока в плане замены в них тиристорных выпрямителей с системами импульсно-фазового управления на активные, с целью повышения их динамических и энергетических показателей.

4. Полученные результаты при условии проведения дополнительных исследований энергетических показателей работы и сравнения их с экспериментальными испытаниями рассмотренных САР АВТ в дальнейшем предполагается применить при разработке авиационных систем генерирования электроэнергии.

Библиографический список

1. Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.

- 2. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Калыгин А. И. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. С. 42–49.
- 3. Shreiner R. T., Efimov A. A., Kalygin A. I. Active Current Converter Mathematical Model // 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMC-2000). 5–7 September 2000: Proceedings. Kosice, Slovakia. Vol. 2. 2000. Pp. 2–193.
- 4. Doval-Gandoy J., Castro C., Penalver C. M. Dynamic and Steady State Analysis of a Three Phase Buck Rectifier // Proceeding 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMC 2000). 5–7 September, 2000. Koshice, Slovac Republic. Pp. 2–137.
- 5. Pires V. E., Fernando Silva J. Sliding Mode Current Controller for Three-Phase Single State AC/DC Buck Boost Converters // Proceeding 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMC 2000). 5–7 September 2000. Koshice, Slovac Republic. Pp. 151–156.
- 6. 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.
- 7. Wiseman J. C., Wu B. Active Damping Control of a High-Power PWM Current-Source Rectifier for Line-Current THD Reduction // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 52. No. 3. June 2005.

- 8. *Ефимов А. А.*, *Мухаматшин И. А.* Управление активными преобразователями в системах электроснабжения и электропривода // Известия РАН. Энергетика. № 4. 2005. С. 91–112.
- 9. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Мухамат-шин И.А. Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты // Электротехника. № 9. 2005. С. 47–53.
- 10. Adzic M. S., Adzic E. M., Katic V. A. Space Vector Modulated Three-Phase Current Source Converter for DC Motor Drive // 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMS 2010). Macedonia, 2010. Pp. T5. Pp. 52–59.
- 11. Ефимов А. А. Управление активными преобразователями в составе электромеханических систем // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журнал. № 2. СПб.: ГУАП, 2012. С. 58–67.
- 12. Ефимов А. А., Косулин В. Д., Мельников С. Ю. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями // Информационно-управляющие системы: науч. журнал. СПб.: ГУАП, 2014. № 4. С. 48–53.
- 13. *Ефимов А. А.* Управление активными преобразователями тока // Завалишинские чтения: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2014. С. 61–67.
- 14. *Волков А. Г.* Многозонные электронные конверторы для автономных систем генерирования электрической энергии: автореф. дисс. к.т.н. Новосибирск: НГТУ, 2016. 21 с.
- 15. Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Управление активным однофазным выпрямителем тока // Завалишинские чтения. СПб.: ГУАП, 2017. С. 157-162.

УДК 681.5

В. Ф. Шишлаков**

доктор технических наук, профессор

В. Г. Курбанов*,**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

М. В. Бураков**

кандидат технических наук, доцент

* Институт проблем машиноведения РАН

** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается решение задач прямой и обратной задачи кинематики модулей интеллектуальных электромеханических систем. Приводится описание кинематической модели системы, а также варианты решения оптимизационных задач по управлению траекториями движения.

Ключевые слова: электромеханическая система, интеллектуальное управление, оптимизация.

V. F. Shishlakov**

Dr. Sc., Tech., Professor

V. G. Kurbanov*,**

PhD, Phys.-Math., Senior Researcher

M. V. Burakov**

PhD, Tech., Associate Professor

*Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences

**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM OF KINEMATICS OF INTELLIGENT ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

The solution of the problems of the direct and inverse problem of the kinematics of the modules of intelligent electromechanical systems is considered. A description is given of the kinematic model of the system, as well as variants of solving optimization tasks for controlling trajectories of motion.

Keywords: electromechanical system, intelligent control, optimization.

Для решения задачи управления большой интерес представляют решения прямой и обратной задачи кинематики для разных модулей интеллектуальных электромеханических систем (ИЭМС). Разнообразные объединения структур (последовательные, параллельные, древовидные и др.) ИЭМС позволяют легко конструировать новые интеллектуальные роботы с более широкими технологическими возможностями (облегчение конструкций, совмещение в одном механизме транспортных и технологических операций, гибкость конструкций и т. д.). Вместе с тем такие механизмы обладают более сложной кинемати-

ческой схемой, что требует использования более развитых алгоритмов управления и решения новых, сложных оптимизационных задач, обеспечивающих реализацию оптимальных траектории движений без заклиниваний.

Кинематическая модель системы

Рассматриваем кинематическую модель ИЭМС (рис. 1).

На рис. 1 приняты обозначения: О — центр верхней платформы ЭМС в исходном положении (после инициализации); O_1 — центр нижней

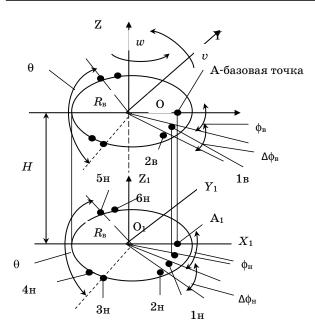


Рис. 1. Кинематическая модель

платформы; ОХ, ОУ, ОZ - оси базовой системы координат с началом в точке О; ОХ – направлена горизонтально и проходит через базовую точку А; ОҮ – направлена горизонтально и перпендикулярно оси ОХ; ОZ - направлена вертикально вверх; 1в, 2в, 3в, 4в, 5в и 6в – точки проекции центров верхних шарниров 1 - 6 НА на верхнюю платформу; 1н, 2н, 3н, 4н, 5н и 6н - точки проекции центров нижних шарниров 1 - 6 НА на нижнюю платформу; $\theta = 120^{\circ}$ – угол между парами шарниров соседних НА на нижней и верхней платформе; H – высота ЭМС измеряемая как расстояние между точками О и O_1 ; $R_{\scriptscriptstyle B}$ — радиус верхней платформы; $R_{\rm H}$ — радиус нижней платформы; $\phi_{\rm B}$ – угол поворота точки 1в относительно точки А в плоскости ХУ в исходном положении; $\Delta \phi_{_{\rm B}}$ – угол поворота точки 2в относительно точки 1в в плоскости ХУ в исходном положении; A_{1} – проекция базовой точки $\mathbf A$ на нижнюю платформу в исходном положении; $\phi_{\rm H}$ – угол поворота точки 1н относительно точки A_1 в плоскости $X_1 Y_1$; $\Delta \phi_{_{\mathrm{H}}}$ – угол поворота точки 2н относительно точки 1н в плоскости $X_1Y_1; \Psi$ – угол поворота точки 1н относительно проекции точки 1в на нижнюю платформу в плоскости X_1Y_1 ; $X_{1}Y_{1}Z_{1}$ – система координат с началом в точке O_1 ; x(t) – перемещение верхней платформы вдоль оси OX; y(t) – перемещение верхней платформы вдоль оси OY; z(t) - перемещение верхней платформы вдоль оси OZ; u(t) – угол поворота против часовой стрелки верхней платформы относительно оси X; v(t) – угол поворота против часовой стрелки верхней платформы относительно оси У (у фирмы РІ этот угол направлен по часовой стрелке); w(t) – угол поворота против часовой стрелки верхней платформы относительно оси Z; $\Delta R_{\rm p}(t)$ – сжатие или растяжение верхней платформы; $\Delta R_{\rm H}(t)$ – сжатие или растяжение нижней платформы; i – номер HA; в – верхняя платформа; н – нижняя платформа; ${\bf r}_{i{\rm B}}$ – вектор из точки О в точку $i{\rm B}$; ${\bf r}_{i{\rm H}}$ – вектор из точки ${\rm O}_1$ в точку $i{\rm H}$; x(0)=0, y(0)=0, z(0)=0, u(0)=0, v(0)=0, w(0)=0 – исходное положение ЭМС (после инициализации).

Постановка задачи

Известно, что если происходит одновременное смещение (x(t), y(t)) и z(t)) и поворот на углы (u(t), v(t)) и w(t)) верхней платформы, а также сжатие или растяжение верхней $(\Delta R_{\rm B}(t))$ и нижней $(\Delta R_{\rm H}(t))$ платформ ЭМС, то радиусы-вектора будут изменяться следующим образом [1]:

$$\mathbf{r}_{iB}(x, y, z, u, v, w, \Delta R_{B}(t)) =$$

$$= \mathbf{C}_{u} \mathbf{C}_{v} \mathbf{C}_{w} \left(\mathbf{r}_{iB}(0) + \mathbf{A} + \mathbf{B}_{iB}(t) \right)$$
(1)

$$\mathbf{r}_{iH}(\Delta R_{R}(t)) = (\mathbf{r}_{iH}(0) + \mathbf{B}_{iH}(t)) \tag{2}$$

где

$$\mathbf{C}_{u} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -(u(t)) \\ 0 & u(t) & 1 \end{vmatrix}, \ \mathbf{C}_{v} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & v(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -(v(t)) & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{w} = \begin{vmatrix} 1 & -(w(t)) & 0 \\ w(t) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Следовательно, описание длины ног актуаторов (НА) имеет следующий вид:

$$\begin{split} L_{i}(x, y, z, u, v, w, \Delta R_{_{\rm B}}, \Delta R_{_{\rm H}}) &= \\ &= (r_{i_{\rm B}}{}^{x}(x, y, z, u, v, w, \Delta R_{_{\rm B}}) - r_{i_{\rm H}}{}^{x}(\Delta R_{_{\rm B}}))^{2} + \\ &+ (r_{i_{\rm B}}{}^{y}(x, y, z, u, v, w, \Delta R_{_{\rm B}}) - r_{i_{\rm H}}{}^{y}(\Delta R_{_{\rm H}}))^{2} + \\ &+ (r_{i_{\rm B}}{}^{z}(x, y, z, u, v, w, \Delta R_{_{\rm B}}) - r_{i_{\rm H}}{}^{z}(\Delta R_{_{\rm H}}))^{2})^{1/2}. \end{split} \tag{3}$$

Поскольку

$$C = C_{u} \cdot C_{v} \cdot C_{w} = \begin{vmatrix} 1 & -w & v \\ uv + w & -uvw + 1 & -u \\ -v + uw & vw + u & 1 \end{vmatrix},$$
(4)

Можно записать (1) и (2) в следующем виде:

$$\mathbf{r}_{iB} = \begin{vmatrix} r_{iB}^{x} + x + B_{iB}^{x} - w(r_{iB}^{y} + y + B_{iB}^{y}) + \\ +v(r_{iB}^{z} + z + B_{iB}^{z}) \\ (uv + w)(r_{iB}^{x} + x + B_{iB}^{x}) + (1 - uvw) \times \\ \times (r_{iB}^{y} + y + B_{iB}^{y}) - u(r_{iB}^{z} + z + B_{iB}^{z}) \\ (uw - v)(r_{iB}^{x} + x + B_{iB}^{x}) + (vw + u) \times \\ \times (r_{iB}^{y} + y + B_{iB}^{y}) + r_{iB}^{z} + z + B_{iB}^{z} \end{vmatrix}$$
(5)

$$\mathbf{r}_{iH} = \begin{vmatrix} r_{iH}^{x} + B_{iH}^{x} \\ r_{iH}^{y} + B_{iH}^{y} \\ r_{iH}^{z} + B_{iH}^{z} \end{vmatrix}. \tag{6}$$

Учитывая, что даны L_i (i=1,2,...,6), R_B , R_H , из (3), (5) и (6) получаем следующую систему нелинейных уравнений:

$$[(r_{iB}^{x} + x + B_{iB}^{x} - w(r_{iB}^{y} + y + B_{iB}^{y}) + v(r_{iB}^{z} + z + B_{iB}^{z}) - (r_{iH}^{x} + B_{iH}^{x})]^{2} + v(r_{iB}^{y} + z + B_{iB}^{y}) - (r_{iH}^{x} + B_{iH}^{x})]^{2} + ((uv + w)(r_{iB}^{x} + x + B_{iB}^{x}) + (1 - uvw) \times (r_{iB}^{y} + y + B_{iB}^{y}) - u(r_{iB}^{z} + z + B_{iB}^{z})) - (r_{iH}^{y} + B_{iH}^{y})]^{2} + ((uw - v)(r_{iB}^{x} + x + B_{iB}^{x}) + (vw + u)(r_{iB}^{y} + y + B_{iB}^{y}) + (r_{iB}^{z} + z + B_{iB}^{z}) - (r_{iH}^{z} + B_{iH}^{z})]^{2} = L_{i}^{2},$$

$$(7)$$

где, i = 1, 2, ..., 6.

В результате получаем:

$$\begin{cases}
f_{1}(x,y,z,u,v,w) = 0 \\
\vdots \\
f_{6}(x,y,z,u,v,w) = 0
\end{cases}$$
(8)

где $f_i(x,y,z,u,v,w)$, i=1,...,6 — нелинейные функции, определенные и непрерывные в заданных областях. Или в векторном виде:

$$\xi = (x, y, z, u, v.w)^{T}, F(\xi) = [f_{1}(\xi), ..., f_{6}(\xi)]^{T},$$

$$0 \le x \le \overline{x}, 0 \le y \le \overline{y}, 0 \le z \le \overline{z}, 0 < u \le \overline{u}, 0 < v \le \overline{v},$$

$$0 < w \le \overline{w}, F(\xi) = 0.$$
(9)

Использование метода Ньютона

Для нахождения решения (8) или (9) используем метод Ньютона, т. е.

$$\boldsymbol{\xi}^{(k+1)} = \boldsymbol{\xi}^{(k)} - \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\xi}^{(k)}).F(\boldsymbol{\xi}^{(k)}), \quad k = 0,1,2,....$$
 (10)
Здесь \mathbf{J} – матрица Якоби:

Вычисление обратной матрицы является трудоемким процессом, преобразуем (10) следующим образом:

$$J(\xi^{(k)}).\Delta\xi^{(k)} = -.F(\xi^{(k)}), \ k = 0,1,2,....$$

$$\Delta\xi^{(k)} = \xi^{(k+1)} - \xi^{(k)}.$$

Получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно поправки $\Delta \xi^{(k)}$. После ее определения вычисляется следующее приближение:

$$\xi^{(k+1)} = \xi^{(k)} + \Delta \xi^{(k)}$$
.

В итоге получается следующий алгоритм расчета:

- 1. Задается начальное приближение $\xi^{(0)}$ и малое положительное число ε (точность). Положим k=0.
- 2. Вычисляется матрица Якоби и решается система линейных алгебраических уравнений относительно поправки $\Delta \xi^{(k)}$.

$$J(\xi^{(k)}).\Delta\xi^{(k)} = -.F(\xi^{(k)}), k = 0,1,2,...$$

- 3. Рассчитывается следующее приближение: $\xi^{(k+1)} = \xi^{(k)} + \Delta \xi^{(k)} \; .$
- 4. Если $\Delta^{(k+1)} = \max_{i} \left| \xi^{(k+1)} \xi^{(k)} \right| \le \varepsilon$, процесс

заканчивается и принимается $\xi^* \approx \xi^{(k+1)}$. Если $\Delta^{(k+1)} > \varepsilon$, то k=k+1 и перейти к пункту 2.

Для сходимости метода Ньютона достаточно, чтобы функция $F(\xi)$ была непрерывна дифференцируема, матрица Якоби невырожденная. При хорошем начальном приближении сходимость метода является квадратичной. Можно применять другие методы (упрощенный метод Ньютона, метод Пройдена, метод секущих и т. д.), но ограничения для нелинейных функций и на матрицу Якоби для данной задачи оказывается трудоемким [2, 3].

Использование нейронной сети Хопфилда

Нейронные сети (НС) Хопфилда [4] обычно применяются в качестве моделей ассоциативной памяти. Это однослойные рекуррентные динамические сети, то есть сети с одним слоем нейронов, где выходы каждого из нейронов подаются обратно на входы других.

Динамику нейрона HC Хопфилда описывают уравнения:

$$\begin{cases}
\frac{dx_i}{dt} = \sum_j w_{ij} u_j - I_i; \\
u_j = \varphi(x_j) = \tanh\left(\frac{x_j}{\beta}\right),
\end{cases} (11)$$

где w_{ij} – вес связи нейронов i и j, u_j – выход j-го нейрона, I_i – вход i-го нейрона (смещение), β регулирует наклон активационной функции.

Способности НС Хопфилда к минимизации заданной энергетической функции позволяют использовать их в различных задачах оптимизации. Например, в [5] рассмотрено использование

HC этого типа для решения систем нелинейных уравнений, а в [6] – для решения задачи идентификации нелинейного динамического объекта.

Нейронная сеть Хопфилда может быть использована и для поиска решения (8).

Для системы нелинейных уравнений (8) энергетическая функция может быть представлена в виде:

$$E = \sum_{i=1}^{6} (f_i(x, y, z, u, v, w))^2.$$
 (12)

Динамика НС должна быть реализована таким образом, чтобы функция (12) стала функцией Ляпунова, т. е. имела отрицательную производную. В этом случае динамическая НС стремится достичь минимума энергии, которому соответствуют некоторые постоянные значения ее выходов.

Можно показать [5], что динамика устойчивой НС определяется выражением:

$$\frac{du_j}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial x_i}.$$

Тогда, используя (12), получаем описание динамики НС в виде:

$$\frac{du_{1}}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial x} = -2\left(\sum_{i=1}^{6} \frac{\partial f_{i}(x, y, z, v, u, v, w)}{\partial x}\right);$$

$$\frac{du_{2}}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial y} = -2\left(\sum_{i=1}^{6} \frac{\partial f_{i}(x, y, z, v, u, v, w)}{\partial y}\right);$$

$$\frac{du_{3}}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial z} = -2\left(\sum_{i=1}^{6} \frac{\partial f_{i}(x, y, z, v, u, v, w)}{\partial z}\right);$$

$$\frac{du_{4}}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial u} = -2\left(\sum_{i=1}^{6} \frac{\partial f_{i}(x, y, z, v, u, v, w)}{\partial u}\right);$$

$$\frac{du_{5}}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial v} = -2\left(\sum_{i=1}^{6} \frac{\partial f_{i}(x, y, z, v, u, v, w)}{\partial v}\right);$$

$$\frac{du_{6}}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial w} = -2\left(\sum_{i=1}^{6} \frac{\partial f_{i}(x, y, z, v, u, v, w)}{\partial v}\right).$$

Используя (13), можно описать нейросетевое решение как прямой, так и обратной позиционной задачи. Прямую позиционную задачу формулируют следующим образом: известны длины актуаторов, требуется определить координаты всех узлов. Обратная позиционная задача формулируется как задача отыскания длин актуаторов по известным положениям узлов.

На рис. 2 показана схема решения прямой позиционной задачи.

Таким образом, получено алгоритмическое описание задачи кинематики при управлении ИЭМС. Показаны варианты решения этой задачи, которые могут быть использованы при синте-

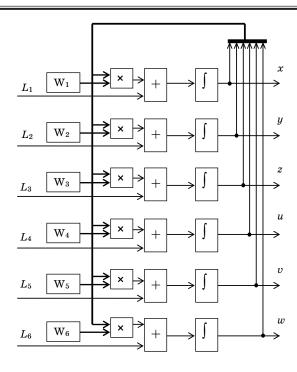


Рис. 2. Структура НС Хопфилда для решения прямой позиционной задачи

зе системы автоматического управления с требуемым качеством динамических процессов.

Библиографический список

- 1. Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. The Direct Problem of Kinematics SM8 SEMS // Smart Electromechanical Systems. 2016. Pp. 129–143.
- 2. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы. М.: Мир, 1982.
- 3. *Курбанов В. Г.* Математические методы в теории управлении: учеб. пособие. СПб.: Издво ГУАП, 2008.
- 4. Hopfield J. J. Neural networks and phisical systems with emergent collective computational abilities // Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. 1982. Vol. 79. Pp. 2554–2558.
- 5. *Бураков М. В.* Решение алгебраических уравнений при помощи нейронной сети Хопфилда // Завалишинские чтения 17. ГУАП, 2017. С. 14–18.
- 6. Бураков М. В. Применение нейронной сети Хопфилда для идентификации динамического объекта // XIX Всероссийская науч.-техн. конф. Нейроинформатика-2017: сб. науч. тр.: в 3 ч. М. 2017.

УДК 681.5

В. Г. Курбанов*,**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

М. В. Бураков**

кандидат технических наук, доцент

*Институт проблем машиноведения РАН

РЕШЕНИЕ СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Рассматривается проблема решения системы логических функций, которая возникает при анализе и синтезе интеллектуальных систем управления нелинейными динамическими объектами. Предлагается арифметизация логических функций путем использования базиса Жегалкина и эволюционное решение системы логических функций с помощью генетического алгоритма.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, система логических функций, генетический алгоритм.

V. G. Kurbanov*,**

PhD, Phys.-Math., Senior Researcher

M. V. Burakov **

PhD, Tech., Associate Professor

*Institute of Problems of Mechanical Engineering

**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SOLVING OF LOGIC FUNCTIONS SYSTEMS USING GENETIC ALGORITHM

The problem of solving a system of logical functions that occurs in the analysis and synthesis of intelligent control systems for nonlinear dynamic objects is considered. The arithmetic of logical functions is proposed by using the Zhegalkin basis and the evolutionary solution of the system of logical functions by means of a genetic algorithm.

Keywords: intellectual control, system of logic functions, genetic algorithm.

При анализе и синтезе интеллектуальных систем управления нелинейными динамическими объектами, функционирующими в нестационарных, экстремальных условиях с заданными показателями качества, одной из важнейших задач является задача логического вывода и принятия решения для системы логических функций, записанной в символьном виде. Решение такой задачи в символьном виде наталкивается на принципиальные трудности и лишь в простейших случаях достигается методами направленного перебора.

В более сложных случаях основными методами ее решения являются эвристические методы, в которых большую роль играет интуиция и знания по решению аналогичных задач и предшествующий практический опыт. Эти знания в экспертных системах используются так называемой машиной логического вывода, то

есть программой, оперирующей с базой знаний и формирующей выводы. Одной из разновидностей машины логического вывода является система продукционных правил (система продукций), которая наиболее часто применяется в экспертных системах.

Работа системы продукций может рассматриваться как выполнение следующей последовательности операций: отыскание всех правил, условия которых соблюдены; выбор одного из этих правил и реализация предписанных им действий. Недостатками эвристических методов получения решений в системах логического вывода являются: отсутствие гарантии решения за конечное число шагов алгоритма, случайность выборе наиболее рационального пути поиска решения, малая скорость числа логических выводов в единицу времени, чрезмерная сложность интерпретации структурных свойств решателя.

^{**}Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Поэтому интерес к проблемам эквивалентных символьных преобразований логических функций (ЛФ) и образуемых ими систем логических уравнений (СЛУ) неуклонно растет, они лежат в основе решения таких задач искусственного интеллекта, как логический вывод и принятие решений, независимо от того, к какой прикладной области данные решения относятся.

В настоящей работе предлагается вариант описания и решения СЛУ.

Арифметизация систем логических уравнений

Символьное представление ЛФ и СЛУ при больших размерностях логических задач громоздко и неудобно, поэтому актуален поиск других форм представления ЛФ и СЛУ, например таких, в которых используются их арифметические свойства.

Существуют методы, когда для упорядоченного множества строится декартово произведение, элементы которого лексикографически упорядочены и нет необходимости записывать явно все его члены, а достаточно знать, как вычисляется любой из них. При этом благодаря арифметическим свойствам ЛФ и СЛУ, которые они проявляют при их представлении в виде алгебраических структур по mod 2, то есть в алгебре И. И. Жегалкина [1], оказывается возможным сведение логических задач к арифметическим или подобным арифметическим. Это в общем случае позволяет представлять логические системы как линейные структуры, уравнения которых не содержат конъюнктивных элементов, а для анализа и синтеза их структурных свойств использовать математический аппарат векторноматричной алгебры.

Тогда для таких систем логический вывод представляется в качестве процедуры обращения [0, 1] — матриц, а принятие решения является многократным повторением этой процедуры при изменении начальных условий.

Базисный вектор логической системы — упорядоченное множество логических переменных, которые нельзя разложить на более простые, то есть они не могут быть продуцированы другими переменными:

$$\mathbf{x}^{\mathrm{T}} = \langle x_1, x_2, ..., x_n \rangle$$

где символ $^{\mathrm{T}}$ означает транспонирование вектора \mathbf{x} .

 Φy ндаментальный вектор логической системы — упорядоченное множество элементов декартова произведения базисного вектора \mathbf{x} , дополненного 1 на месте последнего элемента:

$$\mathbf{S}^{\mathrm{T}} = \langle x_1, x_2, ..., x_n, x_1 x_2, x_1 x_3, ..., x_1 x_2 x_3, ..., x_1 x_2, ..., x_n, 1 \rangle.$$

Размерность этого вектора равна $ns = 2^n$.

 ${\it И}{\it \partial}$ ентификационная строка ${\it \Pi}\Phi$ – строка, состоящая из нулей и единиц вида ${\it C}_i$ = <1, 1, 0, 1,

 $1,\,0,\,1,\,...,\,1$ >. Единицы в данной строке идентифицируют элементы вектора ${\bf S}$, которые в i-й ЛФ складываются по mod2. Если последний элемент идентификационной строки равен 1, то это означает отрицание f_i . Такая форма задания (представления) ЛФ позволяет не вводить дополнительные идентификаторы, например надчеркивания, для обозначения логической связки отрицания НЕ (NOT).

Идея арифметизации символьной логики принадлежит И. И. Жегалкину. Основываясь на алгебре Дж. Буля, он упростил законы оперирования с логическими сложением и умножением и свел эти операции к действиям, на которые распространяются арифметические законы ассоциативности, коммутативности и дистрибутивности. При этом, по И. И. Жегалкину, логическая связка «или» может употребляться только в строго разделительном смысле, как связка «либо». Очевидно, что указанное ограничение выдвигает дополнительное требование к процессу формирования баз знаний предметной области.

Одним из важнейших свойств введенной И. И. Жегалкиным алгебры логики является то, что в ней логическое содержание символов «1» и «0» соответствует всегда истинной или ложной функции, а операция отрицания заменена на операцию прибавления к логической переменной единицы:

$$x = x \otimes 1$$
.

Отличительной особенностью представления ЛФ в базисе Жегалкина (БЖ) является то, что при осуществлении их преобразований ЛФ могут рассматриваться как алгебраические выражени в символьном виде, а операции манипулирования с ними представляют собой операции алгебры. Такими операциями являются: сложение, умножение, перенесение выражений из левой части в правую и наоборот, составление и решение систем уравнений, в том числе матричными методами, подстановки одних функций в другие, приведение подобных членов. При этом они не противоречат аксиомам БЖ.

Таким образом, при решении систем ЛУ их арифметизация легко осуществляется переводом ЛФ из булева базиса в БЖ, а при интерпретации полученных решений — обратно в булев базис. Поэтому решение и анализ логических задач сводятся к анализу и решению системы:

$$\mathbf{AS} = \mathbf{b},\tag{1}$$

где A — прямоугольная двоичная матрица размерностью [n, m], n > m; S — фундаментальный вектор логической системы размерностью n; b — двоичный вектор размерностью n.

Основная задача состоит в том, чтобы найти матрицу, псевдообратную матрице **A.** Решение системы (1), в которой переменных больше,

чем уравнений, приводит к множеству решений. Поэтому псевдообратная матрица не является единственной. Полный их набор определяет все допустимые векторы решений.

Решение системы логических уравнений

Одним из методов решения является метод, аналогичный методу исключения К. Ф. Гаусса при решении линейных систем алгебраических уравнений с вещественными числами. Суть метода состоит в сложении уравнений для исключения переменных, входящих в эти уравнения. Эффект поглощения членов уравнений в результате их сложения по mod 2 связан с выполнением одной из аксиом алгебры И. И. Жегалкина:

$$x \oplus x = 0$$
.

Процедура заключается в преобразовании матрицы \mathbf{A} так, чтобы в результате сложения строк матрицы по правилам элементарных преобразований по m od 2 результирующая матрица имела бы минимальное число ненулевых элементов. Это и есть решение.

Если по условию задачи требуется среди возможных допустимых решений найти наилучшее, то ее решение, как правило, связано с проблемами оптимизации. Задачи оптимизации возможны только тогда, когда существует некоторая мера для вектора S. Эта мера скрыта в атрибутах S, так как сам вектор является логическим. Поэтому необходимо ввести определение его меры (нормы), что требует метризуемости множества атрибутов, добиться которой, к сожалению, не всегда просто, а иногда и невозможно.

Оптимизационная задача легче всего решается, если указанная мера имеет скалярный тип. В простейшем случае скалярной мерой, например, может служить евклидова норма, то есть сумма ненулевых элементов вектора S, вес которых условно принимается равным единице. Здесь можно усмотреть аналогию с кодовым расстоянием в теории P. В. Хемминга. Нахождение минимума этой суммы является задачей комбинаторной оптимизации. Известно, что минимизация евклидовой нормы линейной системы с вещественными числами

$$\mathbf{A}_a \mathbf{S}_a = \mathbf{b}_a$$

достигается при выполнении условия

$$\mathbf{S}_{a} = \left(\mathbf{A}_{a}^{\mathrm{T}} \mathbf{A}_{a}\right)^{-1} \mathbf{A}_{a}^{\mathrm{T}} \mathbf{b}_{a}, \tag{2}$$

где $\mathbf{A}_a^{\mathrm{T}}$ – транспонированная матрица \mathbf{A}_a .

Аналогичным является решение, при котором S содержит минимальное число ненулевых компонент, то есть если A^{\sim} – псевдообратная матрица, то решение уравнений (1) имеет вид

$$\mathbf{A}^{\sim}\mathbf{A}\mathbf{S} = \mathbf{A}^{\sim}\mathbf{b}$$
.

Если $\mathbf{A}^{\sim}\mathbf{A} = \mathbf{E} - \mathbf{e}$ диничная матрица, тогда

$$S = A^b$$
.

В системе (1) матрицы и векторы имеют двоичный тип данных, а в выражении (2) элементам присваивается вещественный тип, и задача оптимизации переходит в область атрибутов. Если по условию задачи требуется найти только допустимые решения, то есть весь набор псевдообратных матриц, то решения оптимизационной задачи не требуется. Однако наиболее изученной и часто встречающейся оптимизационной задачей является нахождение допустимого решения с максимальным значением его вероятности, что характерно для нечетких задач принятия решения логико-вероятностного типа.

Допустим, что даны следующие правила работы с данными, например из сенсора некоторого динамического объекта:

If
$$(x_{ij}=1 \land y_{ij}=1 \land z_{ij}=1 \land u_{ij}=1 \land v_{ij}=1 \land w_{ij}=1)$$
, then $q_{ij}=1$ (3)

Правила вида (3) представляют собой импликации на языке алгебры логики или булевой алгебры:

$$x_{ij} \wedge y_{ij} \wedge z_{ij} \wedge u_{ij} \wedge v_{ij} \wedge w_{ij} \rightarrow q_{ij}. \tag{4}$$

Выражения вида (4) можно преобразовать в форму алгебры Жегалкина или в эквивалентные алгебраические уравнения по mod 2 [2].

$$s_{ij} \oplus s_{ij} * \mathbf{q}_{ij} \oplus \mathbf{1} = b_{ij}$$

где: \oplus — знак сложения по mod 2, $_*$ — знак умножения по mod 2, b_{ii} — 0 либо 1 (b_{ij} \in (0,1), и

$$s_{ij} = x_{ij} * y_{ij} * z_{ij} * u_{ij} * v_{ij} * w_{ij}.$$

Тогда полученную систему логических уравнений можно записать в матричной форме по mod2 [2, 3]:

$$\mathbf{A} * \mathbf{F} = \mathbf{B}, \tag{5}$$

где: В — двоичный вектор размерностью n, \mathbf{F} — фундаментальный вектор логической системы размерностью n, строящийся из комбинаций логических переменных $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, u_{ij}, v_{ij}, w_{ij}, q_{ij}$, дополненный 1 на месте последнего элемента, \mathbf{A} — прямоугольная двоичная матрица размерностью [n, m].

Процедуру получения системы уравнений (5) легко формализовать. Для этого вначале можно построить фундаментальный вектор F системы:

$$\mathbf{F}^{\mathrm{T}} = [s_{11}, s_{12}, ..., s_{1n}, s_{21}, ..., s_{mn}, s_{11} * s_{12}, ..., s_{11} * s_{12} * ...$$

$$*s_{mn}, s_{11}*q_{11},..., s_{11}*s_{12**...*}s_{mn}*q_{11}*...*q_{mn}, 1].$$

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:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Алгоритм построения матрицы **A** следуюший:

- 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 mod 2 вида (4) будет иметь большую размерность. Однако в реальных задачах 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 mod 2 меньшей размерности [3]:

$$C*R = G.$$

Таким образом, возникает оптимизационная задача, в которой из множества вариантов решения надо выбрать наиболее приемлемое или субоптимальное решение. Эту проблему можно отнести к классу задач глобальной оптимизации, для решения которых в настоящее время широко используются популяционные методы, такие как генетический алгоритм, реализованный в пакете Optimtool Simulink MatLab [4].

Использование генетического алгоритма

Генетический алгоритм (ГА) является предметно-независимым механизмом глобальной оптимизации, моделирующим базовые принципы эволюции. Для использования ГА в конкретной задаче необходимо:

- 1. Описать функцию пригодности F, которая будет характеризовать каждый вариант решения задачи. Задача оптимизации рассматривается как минимизация F.
- 2. Выбрать способ кодирования решения, то есть описать хромосомы, популяция которых будет видоизменяться под действием генетических операторов.

В рассматриваемой задаче хромосома представляет собой битовую строку длиной n, равной количеству логических уравнений. Элементы строки интерпретируются как логические переменные.

Функцию пригодности можно описать следующим образом:

$$F = \begin{cases} Fb, & if \quad \mathbf{C} * \mathbf{R} \neq \mathbf{G}, \\ \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} r_i}, & if \quad \mathbf{C} * \mathbf{R} = \mathbf{G}, \end{cases}$$
(6)

где $\mathbf{R} = [r_1, r_2, r_3, ..., r_n]^{\mathrm{T}}$.

Значение Fb в (6) представляет собой большую положительную константу, которая служит для отбраковки ложных решений.

Таким образом, при использовании функции (6) наилучшую пригодность имеют варианты ре-

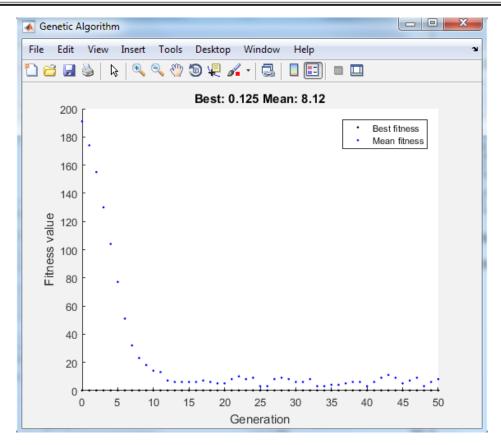


Рис. Иллюстрация работы ГА

шения с наибольшим количеством ненулевых компонент.

Пример моделирования

Рассмотрим систему из 10 логических уравнений от 6 переменных:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Для поиска решения была использована следующая MatLab-функция:

```
function z=kurbanov1(X)
A=[false false true false false true true false;
    true true false true false false true true;
    false true false false true false false
false;
    false true true false false true true
false;
    true false true false true false false
true];

B = [true false true true false];
for i = 1:5
```

```
P(i) = and(A(i,1),X(1));
 for j =2:8
  P(i) = xor(P(i), and(A(i,j),X(j)));
end;
S=0;
for i=1:5
 if (B(i)) == (P(i)) S = S + 1; end;
end;
 if S \sim = 5 z=200; end;
 if S==5
      z=0;
      for i=1:8
      if X(i) \sim = 0 z=z+1; end;
      end;
      z=1/(1+z);
 end;
end
```

В таблице показано состояние популяции на второй итерации.

Состояние популяции

Номер	Хромосома	Пригодность			
1	10111111	0,125			
2	10011100	0,2			
•••	•••	•••			
41	10111111	0,125			
42	11001010	200			
43	00001011	0,25			
44	00111110	0,166			
	•••	•••			
100	00101000	0.33			

На рисунке показано изменение функции пригодности хромосом в процессе поиска решения.

Практическое использование систем логического вывода в интеллектуальных системах связано с решением систем логических уравнений, которые могут иметь большую размерность. Количество переменных при этом обычно превышает число уравнений, что приводит к неединственности решения. Использование алгебры Жегалкина позволяет выполнить алгебраизацию задачи, так что скалярной мерой качества решения может служить эвклидова норма. Генетический алгоритм выступает в этом случае эффективным инструментом поиска субоптимального решения.

Библиографический список

- 1. *Жегалкин И. И.* Арифметизация символической логики // Матем. сб. Т. 35. Вып. 3–4. 1928. С. 335.
- 2. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г. Метод приведения систем логических уравнений к форме линейных последовательностных машин // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 4. С. 37-41.
- 3. Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. Methods of Synthesis of Optimal Intelligent Control Systems SEMS // Smart Electromechanical Systems. 2016. Pp. 25–45. URL: http://dx.doi/org/10.1007/978-3-319-27547-5 4.
- 4. *Бураков М. В.* Генетический алгоритм: теория и практика. СПб.: ГУАП. 2008. 164 с.

УДК 681.5

А. Л. Ляшенко

кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПОЛЯМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ АТОМНОГО РЕАКТОРА

В статье представлено описание системы контроля тепловых полей в активной зоне реактора АЭС РБМК-1000. Рассмотрена методика моделирования объектов с распределенными параметрами. Разработана методика математического моделирования распространения тепла в ячейке технологического канала. Рассмотрена адаптивная система управления распределенной системой. Разработанная методика позволит проводить диагностирование физического состояния энергоблока и осуществлять управление тепловыми полями.

Ключевые слова: реактор, объекты с распределенными параметрами, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, диагностирование, программнотехническое обеспечение, средства контроля, адаптивные системы.

A. L. Liashenko

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

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF THERMAL FIELDS OF THE HEAT-SUPPLYER IN THE ACTIVE ZONE OF THE NUCLEAR REACTOR

The article describes the control system for thermal fields in the core of the RBMK-1000 reactor. The technique of modeling objects with distributed parameters is considered. A technique for mathematical modeling of heat propagation in the cell of the technological channel is developed. An adaptive system for managing a distributed system is considered. The developed technique will allow to diagnose the physical condition of the power unit and to manage the thermal fields.

Keywords: reactor, objects with distributed parameters, differential equation, modeling, control, diagnosis, software and hardware, controls, adaptive systems.

В настоящее время для обеспечения безопасной эксплуатации атомных электростанций (АЭС) осуществляется непрерывный контроль и диагностика параметров реакторной установки. Рассмотрим активную зону реактора АЭС как объект с распределенными параметрами, а для мониторинга параметров технологического процесса разработаем метод неразрушающего контроля с применением методов системного анализа и обработки информации.

Одним из технологических параметров в реакторной установке, требующим постоянного контроля, является температура. Это вызвано необходимостью поддержания экономайзерной зоны в активной зоне на заданном уровне. Значение тепловых полей является критическим параметром, и, как показала практика, их циклическое изменение приводит к возникновению усталости металла в циркониевых трубках, что

приводит к их искривлению, появлению трещин и разрывов. Данные дефекты относятся к критичным, они приводят к заклиниванию тепловыделяющих сборок (ТВС) в технологическом канале, разгерметизации конструкции и утечке радиоактивного теплоносителя.

Решение данной задачи осуществляется посредством изменения количества теплоносителя, поступающего в технологический канал через запорно-регулирующий клапан (ЗРК), находящийся в подреакторном помещении с повышенным уровнем радиации. В настоящее время регулирование ЗРК осуществляется вручную. Предлагаемая система поддержания тепловых полей на заданном уровне по всей протяженности технологического канала (ТК) активной зоны реактора в автоматическом режиме с учетом выгорания атомного топлива в каждом ТК позволит повысить качество и безопасность работы

 $A \ni C$ в целом и оградить $O\Pi$ от радиационного излучения.

Применяя методы теории систем с распределенными параметрами (СРП), мы можем существенно усовершенствовать контроль параметров, диагностику и управление объектом, так как повышается точность при прогнозировании поведения, моделировании, расчете характеристик рассматриваемой системы. Как следствие, получаем увеличение безопасности техногенного объекта и продление срока его службы.

В настоящее время атомная станция является совокупностью различных видов оборудования (представляющего сложную технологическую цепь), в котором постоянно протекают сложные процессы, связанные с преобразованием и передачей различных типов энергии. Какие-либо изменения технологических параметров либо характеристик оборудования в некоторой степени оказывают влияние на параметры системы в целом и на показатели функционирования всей системы. В течение работы термодинамические параметры системы могут меняться в физически возможных границах и технически допустимых изменениях параметров энергоносителей и технологических конторожем.

струкций. Это вызывает необходимость принимать во внимание множество технических ограничений, являющихся необходимыми условиями нормальной работы системы.

Все эти причины в общем случае требуют применения принципа адаптации.

Разработка адаптивной системы

В связи с этим предлагается следующая структурная схема адаптивной системы управления ЗРК [1] с применением распределенного регулятора, представленная на рис. 1.

Алгоритм работы распределенного ПИДрегулятора с автоматической адаптацией состоит из следующих этапов:

- 1) идентификация параметров распределенного объекта регулирования;
- 2) вычисление коэффициентов распределенного ПИД-регулятора;
- 3) ввод коэффициентов в распределенный ПИД-регулятор.

Для проведения идентификации параметров ОРП на действующую систему необходимо подавать, например, ступенчатые или импульсные сигналы, что не всегда может быть выполнено по

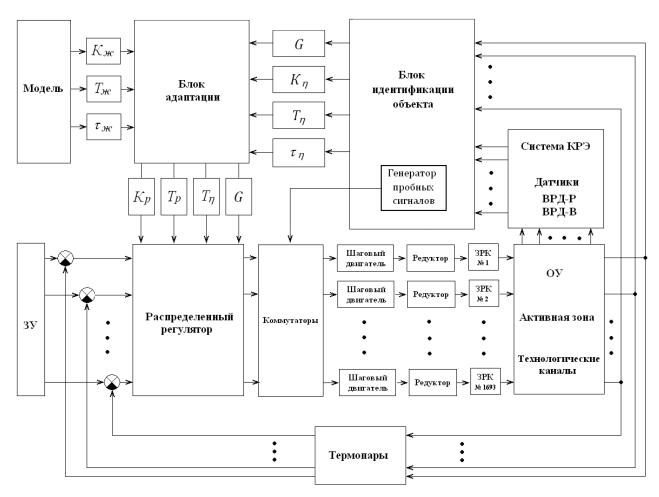


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления

технологическим причинам. Поэтому в качестве идентифицирующих воздействий могут использоваться возмущения и задания, возникающие в процессе нормальной эксплуатации системы. Однако анализ работы различных адаптивных систем говорит, что это реализуемо лишь при подходящих для настройки режимах работы объекта. Работоспособность такого алгоритма в обычно существующих системах с относительно высоким уровнем случайных возмущений обеспечивается тем, что перед включением контроллера в работу осуществляется определение начальных настроек ПИД-регулятора. Затем изменение настроек регулятора алгоритмом адаптации осуществляется относительно начальных в ограниченных пределах, что не приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Применяя блок идентификации, определяем значения параметров K_{η} , T_{η} , τ_{η} объекта управления, которые находим в результате моделирования [2]. Для их нахождения генератор пробных сигналов создает и отправляет на вход объекта входной сигнал вида

$$U(x,y,p) = C_{\eta,\gamma}(s)\sin(\Psi_{\eta} \cdot x) \cdot \sin(\overline{\Psi}_{\gamma} \cdot y). \quad (1)$$

По результатам моделирования определяем численные значения искомых параметров K_{η} , T_{η} , τ_{η} , которые поступают на вход блока адаптации.

Произведем расчет параметров распределенного регулятора для управления ОУ, передаточные функции которого записаны в виде (2). При этом имеются ограничения, наложенные на запасы устойчивости разомкнутой системы.

Запишем желаемую передаточную функцию объекта. Математическая модель объекта рассмотрена в [3]. Параметры передаточной функции обусловлены требованиями к качеству переходного процесса, прописанными в нормативных документах ЛАЭС.

$$W_{\mathcal{H}}(G, p) = \frac{E_{\mathcal{H}}\left[\frac{n_{\mathcal{H}} - 1}{n_{\mathcal{H}}} + \frac{1}{n_{\mathcal{H}}} \cdot G\right]}{T_{\mathcal{H}}\left[\frac{n_{\mathcal{H}} - 1}{n_{\mathcal{H}}} + \frac{1}{n_{\mathcal{H}}} \cdot G\right] \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{\mathcal{H}}p} (2)$$

$$W_{\mathcal{H}}\left(G,p\right) = \\ = \frac{0,7407 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} + \frac{1}{56,3897} \cdot 5,9841\right]}{0,3711 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} + \frac{1}{56,3897} \cdot 5,9841\right] \cdot p + 1}{0,3711 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} + \frac{1}{56,3897} \cdot 5,9841\right] \cdot p + 1} \times \frac{1}{56,3897} \cdot 5,9841 \cdot p + 1}{0,3711 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} + \frac{1}{56,3897} \cdot 5,9841\right] \cdot p + 1}$$

При выборе алгоритма управления и метода расчета настроек регулятора был произведен анализ существующих методов и определены ограничения, накладываемые на их применение. Например, одним из ограничений при реализации адаптивных алгоритмов для контроля температуры теплоносителя в ТК реактора является то, что данную систему регулирования запрещено выводить на границу устойчивости. Это вызвано тем, что адаптация регулятора температуры теплоносителя должна осуществляться непрерывно, а требуемые автоколебания могут быть получены путем изменения структуры регулятора либо его настроек, что будет приводить к неработоспособности САР и может выполняться только с определенной дискретностью по времени.

По результатам проведенного анализа в качестве регулятора предлагается использовать распределенный регулятор, передаточная функция которого (3), (4) разработана с учетом желаемой передаточной функции исследуемого объекта управления (2).

$$W_{p}(G, p) = K_{p} \begin{pmatrix} 1 + \frac{1}{T_{o} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]} \cdot \frac{1}{p} + \\ + \frac{0.5\tau_{\mathcal{K}}^{2}}{T_{\mathcal{K}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{\mathcal{K}}} \cdot p \end{pmatrix}, (3)$$

$$K_{p} = \frac{T_{o} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]}{E_{o} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] \left(T_{\mathcal{H}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{\mathcal{H}} \right)}. \tag{4}$$

Применение данного регулятора для управления расходом воды, проходящей через активную зону канального реактора, и применение принципов адаптации может качественно улучшить анализ и управление объектом.

Для исследуемой системы отклонение параметров распределенного регулятора от заданных может быть определено только в режиме, когда под действием возмущений температура пароводяной смеси отклоняется от номинального значения больше заданной величины и регулятор отрабатывает возмущающий сигнал. По полученному переходному процессу и характеру возмущения системой может приниматься решение о коррекции параметров настройки регулятора в случае несоответствия заданным критериям.

Для моделирования работы адаптивной системы управления температурой теплоносителя в активной зоне реактора было разработано специальное программное обеспечение. На рис. 2 показано диалоговое окно для задания исходных данных и получения значений настроек регулятора.

Подставим в передаточную функцию (3, 4) полученные численные значения параметров.

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'2018



Рис. 2. Расчет параметров регулятора

$$\begin{split} W_{p}(G,p) = \\ = K_{p} \left(1 + \frac{1}{0,5227 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} - \frac{1}{56,3897} \nabla^{2} \right]} \cdot \frac{1}{p} + \\ + \frac{0,5 \cdot 0,1002^{2}}{\left(0,3711 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} - \frac{1}{56,3897} \nabla^{2} \right] + \\ + 0,1002 \right)} \cdot (5) \end{split}$$

$$K_{p} = \frac{0.5227 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} - \frac{1}{56,3897} \nabla^{2} \right]}{\left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} - \frac{1}{56,3897} \nabla^{2} \right] \times \left[\frac{0.7594 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} - \frac{1}{56,3897} \nabla^{2} \right] \times \left[\frac{0.3711 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} - \frac{1}{56,3897} \nabla^{2} \right] + 0.1002 \right]}{0.3791 \left[\frac{56,3897 - 1}{56,3897} - \frac{1}{56,3897} \nabla^{2} \right] + 0.1002} \right]$$

Таким образом, была получена передаточная функция распределенного регулятора, который позволяет реализовать ПИД-алгоритм управления

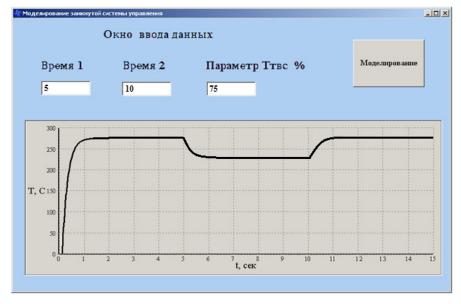


Рис. 3. Окно моделирования адаптивной системы управления

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

На рис. 3 представлено диалоговое окно для моделирования адаптивной системы управления.

В окне моделирования зададим исходные данные. Время изменения энерговыделения зададим в размере 5 секунд, время включения регулятора с адаптированными настройками, при этом будем считать, что энерговыделение упало на 25% от номинального значения.

На рис. 3 показаны результаты моделирования, которые свидетельствуют о надежной работе системы.

Можно сделать вывод, что система контроля и управления с распределенным регулятором, синтезированным с учетом желаемой передаточной функции объекта, выполняет управление температурой с заданной точностью и в полном соответствии с заданными требованиями.

Кроме того, разработана адаптивная система контроля и управления температурой в заданных точках активной зоны реактора с применением принципов параметрической адаптации.

Разработанная система контроля в полном объеме удовлетворяет заявленным требованиям и обеспечивает управление в соответствии с требуемыми показателями качества.

Библиографический список

- 1. Ляшенко А. Л. Разработка адаптивного управления для системы с распределенными параметрами // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XX Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 16–21 сентября 2013 г. в 3-х т. Донецк, ДонНТУ, 2013. Т. 2. С. 95–98.
- 2. Першин И. М. Синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск, 2002. 212 с.
- 3. *Морева С. Л., Ляшенко А. Л.* Математическое моделирование тепловых процессов в активной зоне реактора // Научное обозрение. М.: АПЕКС-94. № 2. 2012. С. 182–188.

УДК 681.5

И. М. Першин

доктор технических наук, профессор Северо-Кавказский федеральный университет

А. Л. Ляшенко

кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТНЫХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА

В статье рассмотрены возможности применения частотных критериев качества для анализа систем с распределенными параметрами. Подробно рассмотрен метод расширенных частотных характеристик, сформулированный для сосредоточенных систем, и представлены результаты его модификации для анализа распределенных систем. Рассмотрена методика построения расширенного пространственного годографа и порядок его применения для оценки запаса устойчивости.

Ключевые слова: системы с распределенными параметрами, частотный анализ, расширенные частотные характеристики, система управления, контроль, моделирование.

I. M. Pershin

Dr. Sc., Tech., Professor North-Caucasian Federal University

A. L. Liashenko

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

ANALYSIS OF SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS WITH THE APPLICATION OF FREQUENCY QUALITY CRITERIA

In the article possibilities of application of frequency quality criteria for the analysis of systems with distributed parameters are considered. The method of extended frequency characteristics formulated for lumped systems is considered in detail and the results of its modification for the analysis of distributed systems are presented. The technique of constructing an extended spatial hodograph and the order of its application for estimating the stability margin are considered.

Keywords: systems with distributed parameters, frequency analysis, extended frequency characteristics, control system, control, simulation.

На сегодняшний день частотные методы широко используются для анализа сосредоточенных и распределенных систем управления. Под частотными методами понимают такие методы, которые не рассматривают вид переходного процесса, а базируются на некоторых частотных свойствах системы. В теории автоматического управления известны обычные частотные характеристики (ОЧХ) и расширенные частотные характеристики (РЧХ).

Обычные частотные характеристики применяют для исследования устойчивости АСР и получаются при переходе в передаточной функции

от переменной p к переменной $j\omega$. Уравнение $p=j\omega$ является уравнением мнимой оси, то есть границы области устойчивости — левой полуплоскости корней характеристического уравнения замкнутой системы. Таким образом, в случае обычных частотных характеристик переменная p изменяется вдоль границы устойчивости. Метод анализа систем с распределенными параметрами с помощью ОЧХ рассмотрен в [1].

Расширенными частотными характеристиками (РЧХ) называются выражения для передаточной функции, для которых переменная p

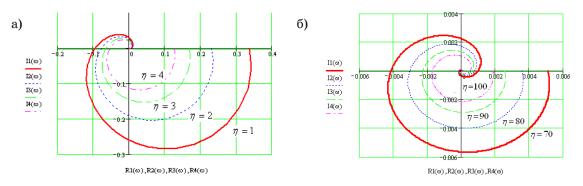


Рис. 1. Расширенные амплитудно-фазовые частотные характеристики: а) для $\eta = 1, 2, 3, 4;$ б) для $\eta = 70, 80, 90, 100$

заменяется уравнением границы заданной колебательности. Для получения РЧХ следует заменить переменную p в передаточной функции уравнением границы заданной колебательности:

$$p = \omega(j-m), \quad 0 \le \omega \le \infty.$$

Метод анализа систем с сосредоточенными параметрами с помощью РЧХ [2] рассмотрен в трудах Е. Г. Дудникова.

Рассмотрим процедуру построения РЧХ с целью их применения для анализа систем с распределенными параметрами.

Рассмотрим процедуру построения РЧХ для системы управления, математическая модель которого имеет вид

$$\frac{\partial Q(x,y,z,t)}{\partial t} = a \times \left\{ \frac{\partial^2 Q(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q(x,y,z,t)}{\partial z^2} \right\},$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z.$$

$$(1)$$

Граничные и начальные условия задаются следующими соотношениями:

$$Q(x,0,z,\tau) = Q(x,L_{11},z,\tau) = 0,$$
 (2)

$$\frac{\partial Q(0,y,z,\tau)}{\partial x} = \frac{\partial Q(L_x,y,z,\tau)}{\partial x} = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial Q(x, y, L_z, \tau)}{\partial z} = U(x, y, \tau), \tag{3}$$

$$\frac{\partial Q(x,y,0,\tau)}{\partial z} = 0,$$
 (4)

$$Q(x,y,z,0) = 0.$$
 (5)

В соответствии с граничными условиями представим входное воздействие на объект управления $U(x,y,\tau)$ в виде ряда Фурье [1]:

$$U(x,y,\tau) = \sum_{\eta,\gamma=1}^{\infty} D_{\eta,\gamma}(\tau) \cdot \sin(\psi_{\eta} \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\phi}_{\gamma} \cdot y), \tag{6}$$

где
$$\psi_{\eta} = \frac{\pi \cdot \eta}{L_x}$$
, $(\eta = \overline{1,\infty})$; $\tilde{\phi}_{\gamma} = \frac{\pi \cdot \gamma}{L_y}$, $(\gamma = \overline{1,\infty})$.

Согласно [1], распределенный объект с такой математической моделью и входным воздействием вида (6) может быть описан передаточной функцией, которая по η , γ $\left(\eta,\gamma=\overline{1,\infty}\right)$ моде вход-

ного воздействия при $z=z(z < L_z)$ имеет вид

$$W_{0,\eta,\gamma}(p) = \frac{\exp\left(\beta_{\eta,\gamma} \cdot z\right) + \exp\left(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot z\right)}{\exp\left(\beta_{\eta,\gamma} \cdot L_z\right) + \exp\left(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot L_z\right)},$$

$$(\eta,\gamma = \overline{1,\infty}), \tag{7}$$

где
$$\beta_{\eta,\gamma} = \left(\frac{p}{a} + \psi_{\eta}^2 + \tilde{\phi}_{\gamma}^2\right)^{1/2}$$
, $\left(\eta,\gamma = \overline{1,\infty}\right)$;
$$\psi_{\eta} = \pi \cdot \frac{\eta}{L_x}; \ \tilde{\phi}_{\gamma} = \pi \cdot \frac{\gamma}{L_y}.$$

 a,z,L_z — заданные числа.

Для частотного анализа произведем замену $p = \omega(j-m)$.

Используя полученные выражения и программный комплекс Mathcad, произведем построение расширенных частотных характеристик по $\eta = 1, 2, 3, 4, 70, 80, 90, 100$ модам входного воздействия (рис. 1).

Запишем передаточную функцию (7) с использованием обобщенной координаты G, в этом случае она примет вид [1]:

$$W_0\left(G,p\right) = \frac{\exp\left(\beta(G) \cdot z\right) + \exp\left(-\beta(G) \cdot z\right)}{\exp\left(\beta(G) \cdot L_z\right) + \exp\left(-\beta(G) \cdot L_z\right)},$$

$$G_{\rm H} \le G \le \infty, \tag{8}$$

где
$$\beta(G) = \left(G + \frac{p}{a}\right)^{1/2}$$
, $G_{\rm H} = \tilde{G}_{\rm H} = \psi_{\eta}^2 + \tilde{\phi}_{\eta}^2$.

Для частотного анализа объекта положим в (8) $p = \omega(j-m)$. При изменении значения ω от 0 до ∞ , а значения G от G_H до ∞ вектор $\mathbf{W}(G,j\omega,m)$ в пространстве $\mathrm{Re}(W)$, $\mathrm{Im}(W)$, G опишет поверх-

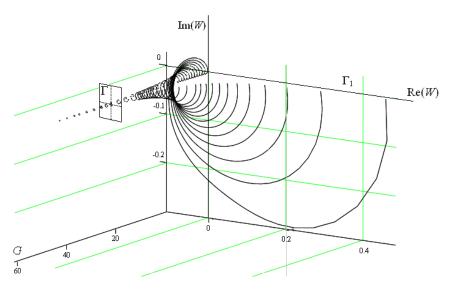


Рис. 2. Расширенный пространственный годограф

ность, которую назовем расширенным пространственным годографом (РПГ) (рис. 2).

Для определения частотной характеристики

объекта по заданной (η, γ, ξ) пространственной гармонической составляющей входного воздействия необходимо рассечь пространственный годограф плоскостью Γ , параллельной плоскости Γ 1 и проходящей через точку с координатами:

Re(*W*)=0, Im(*W*),=0,
$$G = \tilde{G}(\eta, \gamma, \xi)$$
.

След пересечения плоскости Γ и пространственного годографа будет представлять искомую частотную характеристику.

Одним из показателей качества переходного процесса является степень колебательности.

В качестве типовых рекомендуются процессы с заданной степенью затухания $\psi = 0.75 \div 0.9$. Наиболее употребительными при расчетах являются значения m = 0.221...0.336, соответствующие значениям $\psi = 0.75 \div 0.9$.

Используя заданные значения степени колебательности процесса и программный комплекс Mathcad, произведем расчеты показателей колебательности, получим: M=1,656...2,373. Выберем несколько значений, лежащих в этом пределе. Полученные в результате расчетов М-окружности для различных типовых значений показателя колебательности и расширенные амплитудно-фазовые частотные характеристики объекта управления представлены на рис. 3.

В [3] было доказано, что введенные распределенный пространственный годограф и простран-

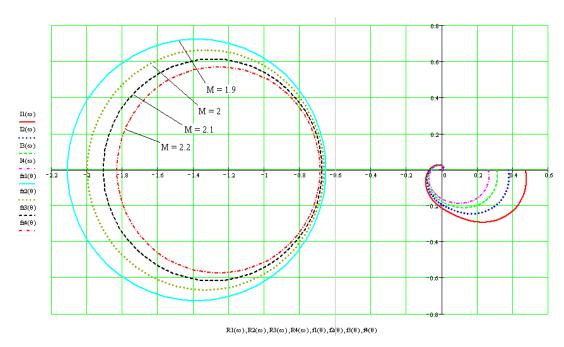


Рис. 3. М-окружности и расширенные амплитудно-фазовые частотные характеристики

Рис. 4. Структурная схема системы управления

ственная М-окружность позволяют сделать следующее утверждение: замкнутая система обладает запасом устойчивости выше заданного, если расширенный пространственный годограф разомкнутой системы не заходит внутрь пространственной М-окружности. Если РПГ касается пространственной М-окружности, то замкнутая система обладает заданным запасом устойнивости

Передаточная функция, согласно [1] и [4], для объекта, записанного с помощью выражений (1)–(5), будет иметь вид

$$W(x,y,z,\rho,\nu,\upsilon,p) = \frac{8}{l_{x} \cdot l_{y} \cdot l_{z}} \times \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \frac{B_{k,m,n}(\cdot)}{p + a\pi^{2} \left(\frac{k^{2}}{l_{x}^{2}} + \frac{m^{2}}{l_{y}^{2}} + \frac{n^{2}}{l_{z}^{2}}\right)},$$
(9)

где принято обозначение

$$\begin{split} B_{k,m,n}\left(\cdot\right) &= \sin\!\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{l_{x1}}\right) \cdot \sin\!\left(\frac{m\cdot\pi\cdot y}{l_{y}}\right) \times \\ &\times \sin\!\left(\frac{n\cdot\pi\cdot z}{l_{z}}\right) \cdot \sin\!\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\rho}{l_{x}}\right) \times \\ &\times \sin\!\left(\frac{m\cdot\pi\cdot v}{l_{y}}\right) \cdot \sin\!\left(\frac{n\cdot\pi\cdot\upsilon}{l_{z}}\right). \end{split}$$

При фиксированных значениях x,y,z — точки наблюдения, ρ, ν, ν — точки действия источника и k,m,n=1 произведем преобразование и получим:

$$W(x,y,z,\rho,\nu,\upsilon,p) = \frac{K_{k,m,n}(x,y,z,\rho,\nu,\upsilon)}{T_{k,m,n}p+1}, \quad (10)$$

где принято обозначение

$$K_{k,m,n}(\cdot) = \frac{8l_1l_2l_3\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{l_x}\right)}{a\pi^2(l_y^2l_z^2k^2 + l_x^2l_z^2m^2 + l_x^2l_y^2n)} \times \\ \times \sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot y}{l_y}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\cdot\pi\cdot z}{l_z}\right) \cdot \sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\rho}{l_x}\right) \times \\ \times \sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot y}{l_y}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\cdot\pi\cdot z}{l_z}\right) \cdot \sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\rho}{l_x}\right) \times \\ T_{k,m,n} = \frac{l_1^2l_2^2l_3^2}{a\pi^2(l_x^2l_x^2k^2 + l_x^2l_x^2m^2 + l_x^2l_x^2n)}.$$

Рассмотрим систему управления с распределенным И-регулятором, представленную на рис. 4.

Передаточная функция распределенного И-регулятора согласно [1] имеет вид

$$W(x,y,p) = E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p}, \quad (11)$$

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

Для частотного анализа произведем замену: для $04X - p = j\omega$.

Используя полученные выражения и программный комплекс MatLab, произведем построение расширенных частотных характеристик по $\eta = 1, 2, 3, 4, 5$ модам входного воздействия.

Если имеется построенная ЛАЧХ (рис. 5), то по имеющимся µ-кривым и при заданном значении М можно достроить требуемое значение запаса по фазе для каждого значения модуля. Для этого воспользуемся методикой, изложенной в [5]. Это построение должно делаться для модулей, лежащих в пределах (12).

$$\frac{M}{M+1} < A < \frac{M}{M-1}. \tag{12}$$

В результате будет получена запретная область для фазовой характеристики.

В результате проведенных исследований было установлено: чтобы показатель колебательности был не больше заданного значения, фазовые характеристики разомкнутой системы по всем пространственным модам входного воздействия не должны заходить в эту область. Нетрудно видеть, что с увеличением порядкового номера моды входного воздействия, фазовые характеристики удаляются от запретной зоны. Таким образом, для данного анализа достаточно знать реакцию объекта управления на первую пространственную моду входного воздействия.

Представленные методики могут использоваться для анализа объектов на запас устойчивости. В частности, полученный расширенный пространственный годограф делает возможным применение критерия Найквиста. Разработанные методики позволяют рассчитывать запас устойчивости по показателю колебательности систем с распределенными параметрами. Полученные с помощью представленной методики расширенные частотные характеристики и M_{η} -окружности позволят рассчитывать настройки распределенных регуляторов, реализу-

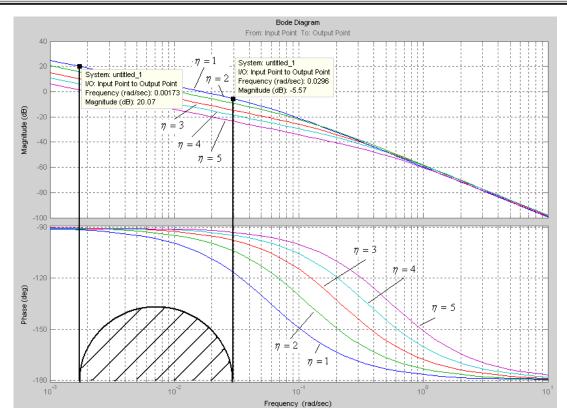


Рис. 5. ЛАЧХ и ФЧХ объекта управления

ющих различные законы управления таким образом, чтобы обеспечивалось расположение всех корней характеристического полинома замкнутой системы внутри сектора, определяемого требуемой степенью колебательности m, а следовательно, и требуемой степенью затухания переходного процесса.

Библиографический список

1. *Першин И. М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: РИА на КМВ, 2007. 244 с.

- 2. Ду∂ников Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов: учеб. пособие для вузов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 264 с.
- 3. Ляшенко А. Л. Частотный анализ объектов с распределенными параметрами с помощью расширенных частотных характеристик // Матер. 6-й науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010). СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор». 2010. С. 65–70.
- 4. *Бутковский А. Г.* Характеристики систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1979. 224 с.
- 5. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.

УДК 621.8

И. А. Салова

кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УГЛА

В работе приведены результаты моделирования угловых погрешностей электромеханических датчиков угла при дополнительном закреплении с помощью сварных швов. Показана зависимость угловых погрешностей от числа сварных швов и температуры окружающей среды.

Ключевые слова: моделирование, электромеханический датчик угла, метод конечных элементов, термомеханическая устойчивость.

I. A. Salova

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

ESTIMATION OF THERMOMECHANICAL STABILITY OF HIGH-PRECISE ELECTROMECHANICAL ANGLE SENSORS

The paper presents the simulation results of the electromechanical angle sensors angular errors with additional fastening by means of welds. The dependence of angular errors on the number of welds and ambient temperature is shown.

Keywords: simulation, electromechanical angle sensor, finite element method, thermomechanical stability.

Электромеханические датчики угла обычно в своем составе содержат статорную и роторную части с зубцовой зоной, расположенной на внутреннем диаметре статора и внешнем диаметре ротора. При эксплуатации высокоточных датчиков угла в следящих системах температура окружающей среды может варьироваться в широких пределах. В связи с этим вероятны относительные смещения зубцовых зон ротора и статора, что может приводить к погрешностям измерения угла. Поэтому при проектировании важно оценить эту погрешность.

Для дополнительной фиксации статорной и роторной частей датчика в устройстве применяют лазерную сварку. Целью исследования является оценка влияния параметров сварки: числа швов и длины шва на точностные характеристики датчиков угла. Исследование проводилось путем моделирования статора и ротора на основе метода конечных элементов с использованием связанной задачи в программном комплексе ELCUT¹.

Сначала решалась задача стационарной теплопередачи при заданной температуре нагрева окружающей среды и естественной конвекции (6 Вт/ (м²К)). Результатом решения этой задачи является распределение температуры во всем объекте. Затем решается задача упругих деформаций, для которой результат предыдущей задачи является входной нагрузкой. Результатом решения второй задачи являются перемещения искомых точек и напряжения, возникающие в теле объекта вследствие изменения температуры при заданном коэффициенте линейного расширения материала.

При исходной температуре (обычно это 20° С) смещение точек отсутствует. На рис. 1 и 2 показаны двухмерные геометрические модели статорной и роторной частей датчика угла. На рисунках приняты следующие обозначения: 1 – статор (ротор); 2 – корпус статора (ротора); 3 – контур для измерения смещений точек зубцовой зоны статора (ротора); 4 – неподвижная часть корпуса; 5 – швы лазерной сварки; 6 – точка начала отсчета контура измерения смещения (по часовой стрелке). В обеих моделях отсутствует зубцовая зона. Она заменена окружностями, соответствующими внутреннему (для статора) и внешнему (для ротора) диаметрами расположения зубцов. Это является допущением моделей. Исследова-

¹ ELCUT v.6.3. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2017 г.

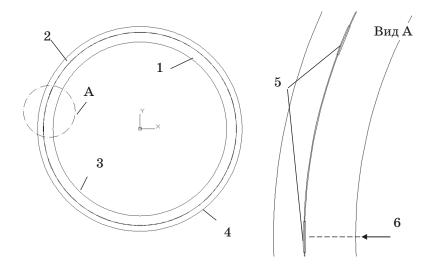


Рис. 1. Геометрическая модель для исследования статорной части датчика

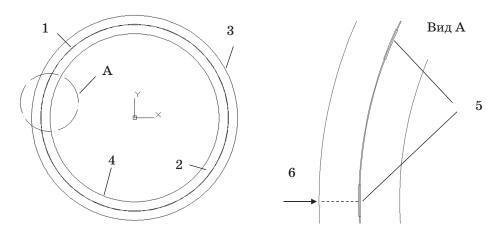


Рис. 2. Геометрическая модель для исследования роторной части датчика

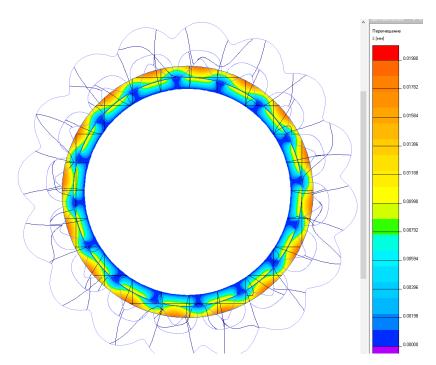


Рис. З. Картина распределения смещений для зубцовой зоны статора

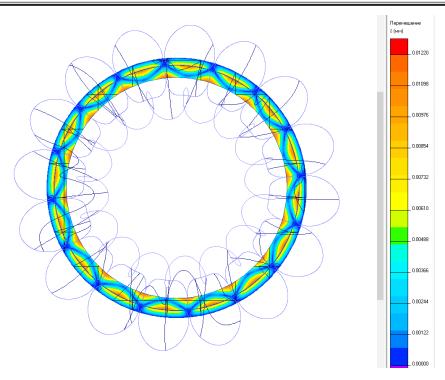


Рис. 4. Картина распределения смещений для зубцовой зоны ротора

ние зависимости смещений точек контуров 3, обращенных к воздушному зазору, от числа равномерно распределенных по окружности швов, а также от протяженности шва проводилось при максимально возможной температуре $T=90^{\circ}\mathrm{C}$. При этом неподвижными объявлялись точки, лежащие на контурах 4 (рис. 1 и 2), а также в местах сварки. На рис. 3 и 4 показано суммарное распределение смещений для точек зубцовой зоны статора и ротора соответственно при числе сварочных швов n=8.

Как следует из рисунков, максимальное смещение наблюдается между соседними швами сварки. Ошибка в измерении угла датчика может возникать, если противоположные зубцы на статоре и роторе в откалиброванном состоянии будут смещаться под воздействием температуры. Поэтому необходимо рассматривать тангенциальную составляющую возможных смещений, получаемую из приращений по осям X и Y. На рис. 5 показано распределение тангенциальных составляющих смещений $\Delta \tau$ по внутренне-

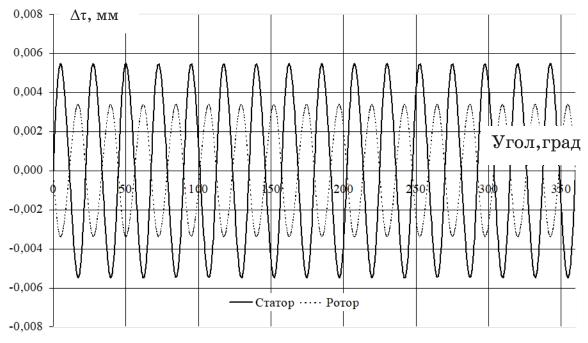


Рис. 5. Распределение тангенциальных составляющих смещений по внутреннему (для статора) и наружному (для ротора) контурам

му (для статора) и наружному (для ротора) контурам. Из этого графика следует, что изменения величин смещения вдоль контуров носят периодический характер.

Рис. 6 иллюстрирует точки, используемые для получения значений смещения и необходимые для последующего анализа. Таким образом, в точках, соответствующих углам 0 и 180° , учитывается составляющая только по оси Y, а в точках, соответствующих углам 90 и 270° , — составляющая по оси X.

Для получения максимальных значений смещений геометрическая модель должна быть повернута на некоторый угол в диапазоне от 0 до $\beta = 360 / 2n$, где 2n — число швов сварки при сохранении положения контура измерения смещения. По результатам моделирования выяснилось (рис. 5), что этот угол находится в районе $\gamma \approx 360/4n$. На рис. 7 показан график зависимости максимальных значений смещений $\Delta \tau$ от числа сварных швов п при фиксированной длине шва (b=15 мм) при максимальном значении температуры окружающей среды T=90 °C. Полученные результаты показывают, что зависимость носит нелинейный характер. При числе сварочных швов n=16 максимальное смещение для статора не превышает 5,4 мкм.

Также была исследована зависимость максимального смещения от длины шва b при фиксированном числе сварочных швов n=16. Результаты моделирования представлены на рис. 8, из которого следует, что зависимость смещения от длины шва незначительна.

Для определения погрешности, вносимой в измерение угла, для каждой из четырех точек, указанных на рис. 6, определим взаимное

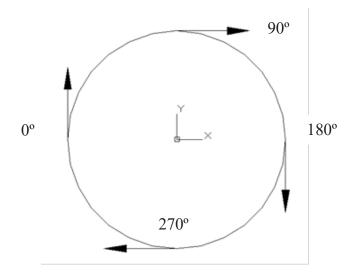
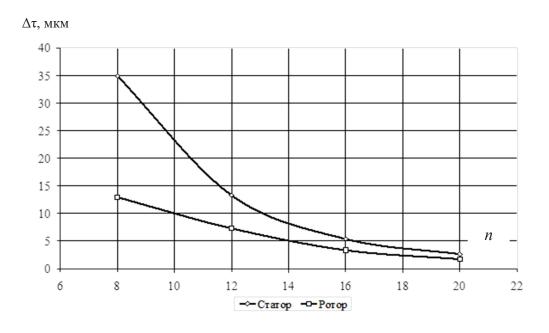


Рис. 6. Точки на контуре для измерения тангенциальной составляющей смещения

угловое перемещение ротора и статора (рис. 9). На рис. 9 для точки, определяющей 0° , приняты следующие обозначения: Δy_c и Δy_p — тангенциальные составляющие смещений статора и ротора в точке A соответственно; R — средний радиус воздушного зазора; O — центр статора и ротора. Тогда взаимное угловое перемещение определяется как:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_p = \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta y_c}{R}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta y_p}{R}\right)$$
 (1)

Аналогично определяются угловые перемещения для остальных точек с учетом того, какие из приращений используются в формуле (1): Δx или Δy .



 $Puc.~7.~3 aвисимость максимальных значений смещений <math>\Delta au$ от числа швов сварки

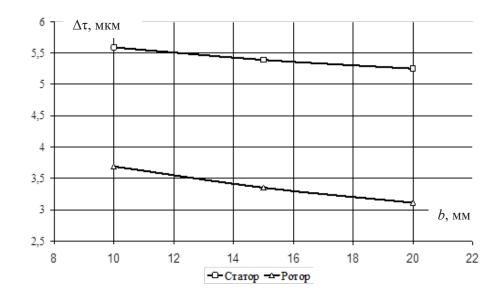


Рис. 8. Зависимость максимальных значений смещений $\Delta \tau$ от длины сварочного шва b при фиксированном числе швов (n=16)

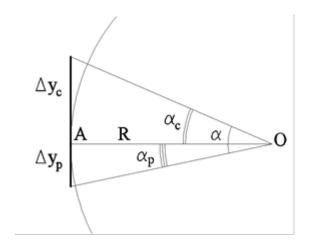


Рис. 9. К расчету угловой погрешности

Просуммировав полученные значения, получим значение погрешности определения угла датчиком. На рис. 10 приведен график зависимости значения суммарной погрешности измерения угла при различном числе сварных швов заданной длины ($b=15\,$ мм). Данные приведены для температуры окружающей среды $T=90\,^{\circ}\mathrm{C}$ и радиуса $R=225\,$ мм.

Также было исследовано влияние температуры окружающей среды на суммарную погрешность при числе сварных швов n=16 и длине шва b=15 мм. Результат моделирования приведен на рис. 11.

Результаты моделирования показали следующее:

- изменения величин тангенциальных смещений вдоль контуров статора и ротора, обра-

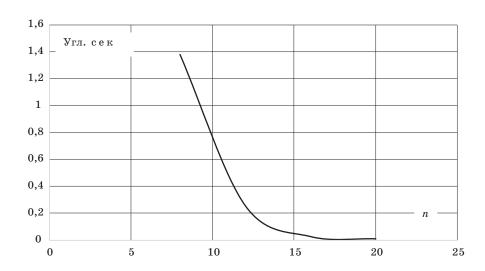


Рис. 10. Зависимость значения суммарной погрешности измерения угла при различном числе сварных швов

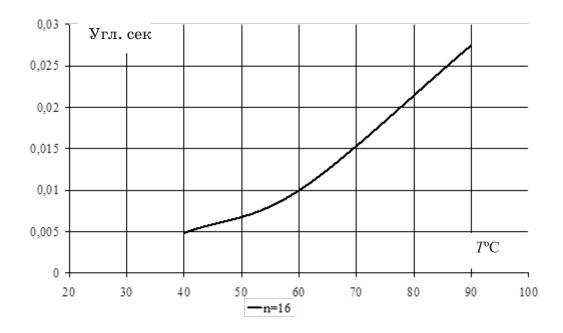


Рис. 11. Влияние температуры окружающей среды на суммарную погрешность датчика угла (n=16, b=15 мм)

щенных к воздушному зазору, носят периодический характер;

- зависимость максимальных смещений от длины сварного шва незначительна;
- зависимость максимальных смещений от числа сварных швов не линейна;
- зависимость суммарной ошибки от температуры практически линейна.

Таким образом, моделирование методом конечных элементов позволяет на стадии проектирования определить погрешность датчика угла при различных вариантах его закрепления в приборе, а также необходимое и достаточное число сварных швов и их длину. УДК 629.3.038, 621.33

В. Ф. Шишлаков*

доктор технических наук, доцент

С. А. Сериков*

доктор технических наук, доцент

С. В. Соленый*

кандидат технических наук, доцент

Е. А. Серикова**

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Рассматривается задача адаптации управления силовой установкой гибридного транспортного средства к текущему ездовому циклу. Приведена формальная постановка оптимизационной задачи, минимизирующей векторный критерий качества при наличии ограничений на параметры состояния и вектор управления, рассмотрено решение задачи методом нейросетевого управления на основе адаптивной критики.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, транспортное средство, искусственная нейронная сеть, нейросетевое управление, адаптивный критик, топливная экономичность, токсичность отработавших газов.

V. F. Shishlakov*

Dr. Sc., Tech., Associate Professor

S. A. Serikov*

Dr. Sc., Tech., Associate Professor

S. V. Solyonyj*

PhD, Tech., Associate Professor

E. A. Serikova**

PhD. Tech., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

ADAPTIVE CONTROL OF HYBRID POWER UNIT OF VEHICLE

The problem of adapting the control of the hybrid vehicle engine to the current driving cycle is considered. Formal statement of the optimization problem minimizing the vector quality criterion under constraints on the state parameters and control vector is resulted. The decision of this problem by a method of adaptive critic designs-based neural networks control is considered.

Keywords: hybrid power unit, hybrid vehicle, artificial neural network, neural networks control, adaptive critic. fuel efficiency, engine emissions.

Повышение экономичности и экологической безопасности транспортных средств (TC), движущихся без внешнего подвода энергии, может достигаться на основе комбинации различных фи-

зических принципов аккумулирования и преобразования энергии в составе одной силовой установки. Этот подход предполагает максимально полное использование преимуществ доступных

способов аккумулирования и преобразования энергии на различных тягово-скоростных режимах и взаимную компенсацию их недостатков. Данное направление развивается в рамках концепции гибридных силовых установок (ГСУ).

В большинстве случает ГСУ включает в себя помимо основного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) вспомогательный тяговый электродвигатель и контур рекуперации энергии, использующий тяговую аккумуляторную батарею (ТАБ) в качестве накопителя энергии. Подзарядка ТАБ может осуществляться при наличии избытка мощности основного двигателя либо путем рекуперации энергии торможения ТС.

Эффективность гибридного TC решающим образом зависит от управления перераспределением потоков мощности между основными ее агрегатами в зависимости от тягово-скоростного режима движения и текущего состояния ГСУ.

Управление силовыми установками большинства современных гибридных ТС осуществляется на основе логических правил [1, 2]. При таком управлении в основном не учитываются особенности конкретной дорожной ситуации и характер ездового цикла. Существует достаточно большое количество публикаций, посвященных совершенствованию данного подхода, однако он не позволяет полностью реализовать потенциал энергоэффективности ГСУ.

Наиболее полно использовать возможности гибридных технологий в части повышения топливной экономичности и экологической безопасности ТС позволяет применение адаптивного управления ГСУ. Однако существенная вычислительная сложность алгоритмов адаптации сдерживает их широкое применение [3, 4].

Существует большое количество работ, посвященных исследованию возможности применения вычислительного интеллекта при управлении силовыми установками гибридных ТС. Управление на основе систем нечеткого вывода применяется в [5, 6]. В работе [3] показана возможность применения генетических алгоритмов для настройки систем нечеткого вывода. Использование искусственных нейронных сетей (ИНС) при управлении ГСУ рассматривается в [6, 7]. Упомянутые исследования показывают существенный потенциал улучшения эксплуатационных характеристик гибридных ТС на основе более эффективного управления ГСУ.

Данная работа посвящена одному из наиболее перспективных и неисследованных подходов к реализации адаптивного управления ГСУ — нейроуправлению с использованием нейросетевого адаптивного критика [8, 9]. В этом случае в структурной схеме САУ содержится специальный блок — критик, оценивающий качество работы всей системы управления с учетом прогноза тягово-скоростного режима движения. Адаптация управления ГСУ осуществляется на основе концепции обучения ИНС с подкреплением. В отличие от работы [7], в состав адаптивного регулятора ГСУ введена нейросетевая модель объекта управления, что позволило существенно улучшить качество управления.

Силовая установка гибридного автомобиля как объект управления

Рассмотрим один из возможных вариантов параллельной схемы построения ГСУ, в которой обратимая электрическая машина (G/M) в качестве вспомогательного двигателя устанавливается в приводе ведущего моста ТС, отличного от ведущего моста трансмиссии первичного ДВС (рис. 1). При торможении обратимая электрическая машина, работая в генераторном режиме, может создавать необходимый тормозной момент на колесах и обеспечивать рекуперацию энергии. Часто в качестве вспомогательного двигателя применяется вентильный электродвигатель (ВЭД).

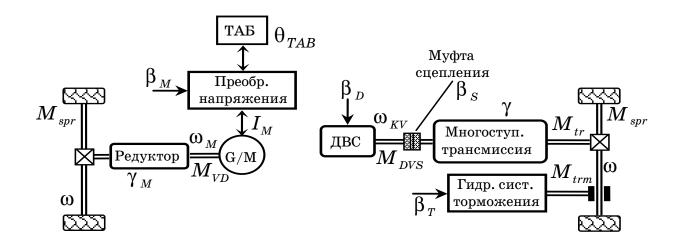


Рис. 1. Параллельная схема гибридной силовой установки

Динамика прямолинейного движения ТС при отсутствии пробуксовывания колес и заблокированной муфте сцепления ($\beta_S = 1$) описывается уравнением [14]:

$$\begin{split} J_{\Sigma.kol} \cdot \frac{d\,\omega}{dt} = \\ = \gamma \cdot M_{DVS} + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr}, \end{split}$$

где $J_{\Sigma.kol}$ — суммарный момент инерции движущихся масс, приведенный к оси вращения ведущих колес; ω — скорость вращения ведущих колес; γ , γ_M — передаточные отношения трансмиссий ДВС и ВЭД соответственно; M_{DVS} — эффективный крутящий момент ДВС; M_{VD} — момент на валу ВЭД; M_{trm} , M_{spr} , M_{tr} — моменты системы гидравлического торможения, сил сопротивления движению и сил трения в элементах трансмиссии соответственно, приведенные к оси вращения ведущих колес.

Математические модели ДВС, ВЭД и ТАБ приведены в работах [10–12]. Момент сопротивления движению ТС определяется силами сопротивления качению, сопротивления движению на подъем или под уклон и аэродинамическим сопротивлением.

Будем рассматривать управление ГСУ как многошаговый дискретный процесс с шагом дискретизации по времени ΔT :

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \Delta T \cdot f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \xi(k)), \\ \mathbf{y}(k) = h(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \end{cases}, k = \overline{0, N},$$

$$N = (t_f - t_s) \cdot \Delta T^{-1},$$

где $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega, \theta_{TAB} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор состояния; $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \beta_D, \beta_M, \beta_T, \gamma \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор управления;

 $\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \alpha, \theta_0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор возмущающих воздействий; $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} V, G_T, E_T \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — вектор выхода; θ_{TAB} степень заряженности ТАВ; β_D – сигнал управления мощностью ДВС, численно равный отношению действительной эффективной мощности, развиваемой двигателем, к максимальной эффективной мощности при данной скорости вращения коленчатого вала, β_M – сигнал управления электромагнитным моментом ВЭД, который определяется отношением требуемого электромагнитного момента к максимальному; β_T — сигнал управления системой гидравлического торможения, который определяет отношение задаваемого момента торможения ведущих колес к максимальному; а - уклон дороги; ϑ_0 – скорость встречного ветра; V – скорость автомобиля; G_T - часовой расход топлива; $E_T = f_T(C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC})$ – степень токсичности отработавших газов ДВС, которая является функцией часовой эмиссии оксидов азота, оксида углерода и углеводородов соответственно; t_s , t_f — моменты времени начала и конца ездового цикла соответственно; $f(\bullet)$ и $h(\bullet)$ — известные непрерывные или кусочно-непрерывные векторфункции векторных аргументов.

Множество всех возможных состояний образует двумерное пространство состояний X:

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}^2_+ \; , \; \forall t \in T = \begin{bmatrix} t_s, \; t_f \end{bmatrix}, \; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \theta_{TAB} \leq 1 \end{bmatrix},$$

на котором можно выделить подмножество эксплуатационных состояний

$$\mathbf{X}_{ex} = \begin{bmatrix} 0 \leq \omega \leq \omega_{ex.\max} \\ \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \end{bmatrix} \subset \mathbf{X}.$$

Выход состояния системы за пределы \mathbf{X}_{ex} нежелателен, хотя и не ведет к аварийной ситуации.

Управляющие воздействия должны быть ограничены:

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbb{R}^4, \ \forall \ t \in T \ , \ \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \beta_D = -1, & 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ -1 \leq \beta_M \leq 1 \\ 0 \leq \beta_T \leq 1 \\ \gamma \in \left\{\gamma_i\right\}, \ i = \overline{1,5} \end{bmatrix}.$$

 $eta_D = -1$ соответствует отключенному состоянию ДВС.

Основной задачей управления ГСУ является поддержание с минимальной ошибкой заданной скорости ТС $V_{zd}(k) = V_{zd}(t_s + k \cdot \Delta T)$, $k = \overline{\mathbf{0}}$, N при наличии возмущений $\xi(k)$, а также ограничений на возможные состояния системы $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ и допустимые управления $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$. Кроме того, процесс управления должен удовлетворять ряду дополнительных условий: минимизации расхода топлива, уровня токсичности отработавших газов, отклонения степени заряженности ТАБ от оптимальной.

Для оценки качества каждого k-го шага управления, переводящего систему из состояния $\mathbf{x}(k)$ в состояние $\mathbf{x}(k+1)$, можно использовать векторный критерий

$$\Im(\mathbf{x}, \mathbf{u}, k) = \Im(k) = \left[\mathbf{J}_{Vk}, \mathbf{J}_{\theta k}, \mathbf{J}_{Gk}, \mathbf{J}_{Ek}\right]^{\mathrm{T}},$$

где

$$\begin{split} \mathbf{J}_{Vk}\left(k\right) &= \\ &= K_{NV} \cdot \left(\left(V_{zd}\left(k+1\right) - V\left(k+1\right)\right)^2 + S_V^2\left(V\left(k+1\right)\right) \right); \\ &\qquad \mathbf{J}_{\theta k}\left(k\right) &= \\ &= K_{N\theta} \cdot \left(\left(\theta_{ex.\mathrm{opt}} - \theta_{TAB}\left(k+1\right)\right)^2 + S_{\theta}^2\left(\theta_{TAB}\left(k+1\right)\right) \right); \end{split}$$

$$\begin{split} \mathbf{J}_{Gk}\left(k\right) &= K_{NG} \cdot G_{T}^{2}\left(k\right); \\ \mathbf{J}_{Ek}\left(k\right) &= K_{NE} \cdot \begin{pmatrix} K_{ENOx} \cdot C_{NOx}^{2}\left(k\right) + \\ + K_{ECO} \cdot C_{CO}^{2}\left(k\right) + K_{EHC} \cdot C_{HC}^{2}\left(k\right) \end{pmatrix}; \end{split}$$

 K_{NV} , $K_{N\theta}$, K_{NG} , K_{NE} — коэффициенты, обеспечивающие нормирование и приведение компонентов критерия $\mathfrak I$ к безразмерным величинам; $\theta_{ex.\mathrm{opt}}$ — оптимальная степень заряженности ТАБ; S_V , S_θ — функции штрафа за выход из области эксплуатационных режимов $\mathbf X_{ex}$:

$$S_{V}\left(V\right) = \begin{cases} 0, & \text{при } \omega \leq \omega_{ex.\max}, \\ r_{kol}\left(\omega - \omega_{ex.\max}\right), & \text{при } \omega > \omega_{ex.\max}; \end{cases}$$

$$\begin{split} S_{\theta}\left(\theta_{TAB}\right) &= \\ &= \begin{cases} \mathbf{0}, & \text{при } \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \text{,} \\ &|\theta_{ex.\min} - \theta_{TAB}|, \text{ при } \theta_{ex.\min} > \theta_{TAB} > \theta_{ex.\max} \text{;} \end{cases} \end{split}$$

 r_{kol} — радиус качения ведущих колес; K_{ENOx} , K_{ECO} , K_{EHC} — коэффициенты токсичности соответствующих компонентов отработавших газов.

Функционал качества управления ГСУ при использовании линейной свертки векторного критерия оптимальности для выделения единственного решения оптимизационной задачи из области парето-оптимальных управлений можно представить в виде

$$\mathbf{J}_{SV\mu}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} \mu^{j} \cdot \sum_{i=1}^{4} \mathbf{K}_{P.i} \cdot \mathfrak{I}_{i}(k+j),$$

где μ — дисконтный фактор, $0 < \mu < 1$; \mathbf{K}_P — вектор приоритетов, определяющий степень важно-

сти отдельных компонентов \mathfrak{I}_i вектора \mathfrak{I} на различных участках ездового цикла:

$$\sum_{i} \mathbf{K}_{P.i} = 1$$
, $\mathbf{K}_{P.i} > 0$, $i = \overline{1, 4}$.

Адаптивное управление гибридной силовой установкой

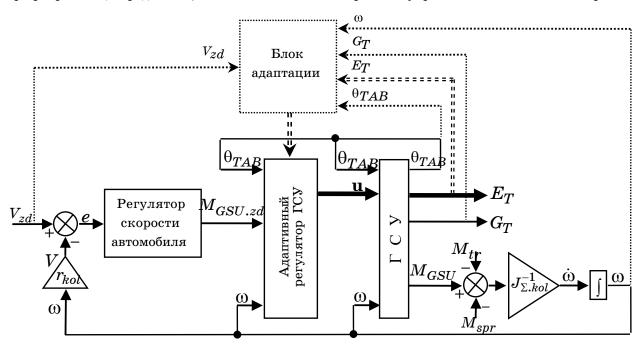
Произведем декомпозицию задачи управления Γ CV на две взаимосвязанные подзадачи. Вначале определим приложенный κ ведущим колесам TC момент вращения Γ CV $M_{GSU}(M) \in [M_{GSU}, M_{GSU}]$, необходимый для поддержания заданного тяговоскоростного режима $V_{zd} = V_{zd}(k)$, k = 0, N-1

при
$$\alpha = \alpha(k)$$
 и $\sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{J}_{Vk}(k) \! o \! \min$. Затем осуще-

ствим распределение $M_{GSU.zd}$ между основным и вспомогательным двигателями ГСУ, а также системой гидравлического торможения: $M_{GSU.zd} = \gamma \cdot M_{DVS} + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm}$ из условия $\mathbf{J}_{SVu} \to \min$.

Структурная схема САУ ГСУ, соответствующая предложенной декомпозиции задачи управления, приведена на рис. 2.

На данной схеме e — ошибка регулирования по скорости. Сигнал $M_{GSU.zd}$ является выходным сигналом регулятора скорости автомобиля $M_{GSU.zd} = f_{V.rg} \left(V, V_{zd} \right)$ и входным для адаптивного регулятора ГСУ. При этом САУ ГСУ имеет в своем составе блок адаптации, обеспечивающий асимптотическое приближение текущей стратегии управления к оптимальной при $t \to \infty$



 $Puc.\ 2.\ Cucmema\ a\partial anmивного\ ynpaвления\ \Gamma C Y$

путем настройки параметров регулятора без использования априорной информации о задающих и возмущающих воздействиях.

При включенном сцеплении и выбранном передаточном отношении трансмиссии в случае прямолинейного движения без пробуксовывания колес ГСУ и непосредственно связанный с ней потребитель мощности – ТС образуют жесткую механическую систему с одной степенью свободы. В этом случае получение оптимального регулятора скорости $f_{V,rg}$ не представляет сложности.

Для описания функционирования адаптивного регулятора, осуществляющего перераспределения нагрузки между агрегатами ГСУ, введем коэффициент использования электропривода:

$$\varepsilon = \gamma_M \cdot M_{VD} \cdot M_{GSU}^{-1}, \ M_{GSU} \neq 0,$$

где M_{GSU} — момент вращения ГСУ, приложенный к ведущим колесам ТС.

В процессе торможения автомобиля, когда $M_{GSU} < 0$, коэффициент $\varepsilon \in [0, 1]$ характеризует уровень рекуперации энергии торможения. При $\varepsilon = 0$ торможение осуществляется исключительно за счет гидравлической тормозной системы. При $\varepsilon = 1$ весь требуемый тормозной момент создается тяговым электроприводом в генераторном режиме: $M_{GSU} = \gamma_M \cdot M_{VD}$, $M_{VD.min} \leq M_{VD} < 0$, где $M_{VD.min}$ — максимальный тормозной момент электропривода в режиме генератора. При

 $0 < \epsilon < 1$ тормозное усилие создается с использованием обеих тормозных систем.

При разгоне автомобиля либо равномерном движении, когда $M_{GSU}>0$, коэффициент $\varepsilon\in (-\infty,1]$ характеризует распределение мощности, производимой ГСУ, между ДВС и тяговым электроприводом. При $\varepsilon<0$ тяговый электропривод работает в генераторном режиме и осуществляет подзарядку ТАБ с использованием энергии, вырабатываемой ДВС. Если $\varepsilon=0$, то для создания тягового усилия используется только ДВС. При $0<\varepsilon<1$ тяговое усилие создается за счет совместного использования тягового электропривода и ДВС. При $\varepsilon=1$ используется только тяговый электропривод.

Если значение требуемого момента вращения $M_{GSU,zd}$ и скорость движения автомобиля $V=\omega r_{kol}$ известны, то при заданных ограничениях и схеме построения ГСУ коэффициент ε полностью определяет вектор управления $\mathbf{u}=f_{GSU,rg}\left(\varepsilon,M_{GSU,zd},V\right)$. При этом задача оптимизации управления ГСУ может быть сведена к задаче определения функции $\varepsilon(k)=\varepsilon \left(M_{GSU,zd}\left(k\right),\mathbf{x}(k)\right), \quad k=\overline{0,N-1}, \quad \text{которая минимизирует функционал } \mathbf{J}_{SV\mu}$ на текущем ездовом цикле.

Одна из возможных структур адаптивного регулятора ГСУ, реализующая концепцию нейросетевого управления с нейросетевыми критиком и моделью объекта управления, приведена на рис. 3.

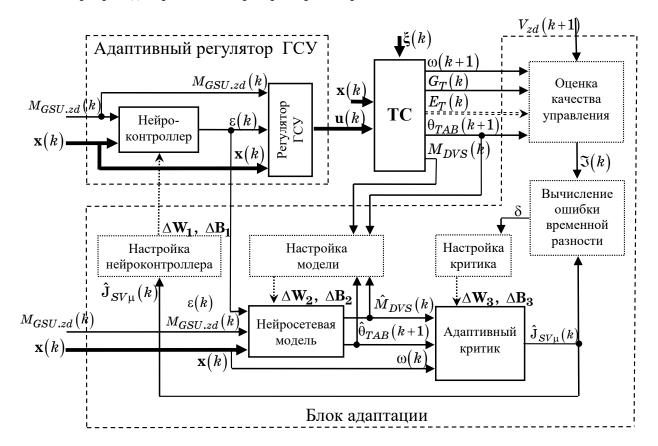


Рис. 3. Адаптивный регулятор гибридной силовой установки

В процессе функционирования САУ ГСУ на k-м шаге управления вычисление коэффициента использования электропривода осуществляется нейроконтроллером $\varepsilon = \mathbf{F}_{GSU.NC} (\mathbf{x}, M_{GSU.zd})$, который реализован в виде трехслойной ИНС прямого распространения, содержащей 12 нейронов в первом скрытом слое и 4 во втором, с активационной функцией нейронов скрытых слоев в виде гиперболического тангенса и линейном нейроне выходного слоя:

$$\begin{split} \mathbf{N}_{11} &= \\ &= 2 : \left(1 + \exp\left(-2 \begin{pmatrix} \mathbf{W}_{11} \times \\ \times \left[\overline{\mathbf{x}}\left(k\right) & \overline{M}_{GSU.zd}\left(k\right)\right]^{\mathrm{T}} + \mathbf{B}_{11} \end{pmatrix}\right)\right) - 1; \\ \overline{\varepsilon}\left(k\right) &= \mathbf{W}_{13} \left(2 : \left(1 + \exp\left(-2 \left(\mathbf{W}_{12}\mathbf{N}_{11} + \mathbf{B}_{12}\right)\right)\right) - 1\right) + \mathbf{B}_{13}, \end{split}$$

где \mathbf{W}_{ij} и \mathbf{B}_{ij} — матрицы весовых коэффициентов и векторы смещений нейронов j-го слоя i-й ИНС; $\overline{\mathbf{x}}$, $\overline{M}_{GSU.zd}$, $\overline{\epsilon}$ — нормированные значения соответствующих величин. Нормирование осуществлялось путем приведения сигналов к нулевому математическому ожиданию и единичному значению дисперсии.

Затем регулятор ГСУ определяет вектор управления $\mathbf{u} = f_{GSU.rg}\left(\varepsilon, M_{GSU.zd}, \mathbf{x}\right)$, и управляющие воздействия подаются на вход объекта управления.

Одновременно нейросетевая модель

 $\left[\hat{M}_{DVS}, \hat{\theta}_{TAB}\right]^{\mathrm{T}} = \mathbf{F}_{GSU.MD}\left(\varepsilon, \mathbf{x}, M_{GSU.zd}\right)$ на основании текущего состояния ГСУ и применяемого управления дает оценку параметров состояния системы, которые критичны с точки зрения оценки функционала $\mathbf{J}_{SV\mu}$, на следующем шаге управления. Нейросетевая модель реализована в виде двухслойной ИНС прямого распространения, содержащей 24 нейрона в скрытом слое с активационными функциями в виде гиперболического тангенса и 2 линейных нейрона выходного слоя:

$$\mathbf{N}_{21} = 2\mathbf{:}$$

$$: \left(1 + \exp\left(-2\left(\times\left[\overline{\varepsilon}(k) \quad \overline{\mathbf{x}}(k) \quad \overline{M}_{GSU.zd}(k)\right]^{\mathrm{T}} + \right)\right) - 1\mathbf{;}$$

$$+ \mathbf{B}_{21}$$

$$\left[\overline{\hat{M}}_{DVS} \left(k \right), \overline{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_{TAB} \left(k+1 \right) \right]^{T} = \mathbf{W}_{22} \mathbf{N}_{21} + \mathbf{B}_{22},$$

где \hat{M}_{DVS} , $\hat{\theta}_{TAB}$ — нормированные значения оценки эффективного крутящего момента ДВС и степени заряженности ТАБ.

Адаптивный критик осуществляет оценку функционала качества управления на данном шаге при выбранном управлении и текущем состоянии ГСУ, опираясь на оценку параметров системы, осуществленной нейросетевой моделью:

 $\hat{\mathbf{J}}_{SV\mu} = \mathbf{F}_{GSU.KR} \Big(\hat{M}_{DVS}, \hat{\theta}_{TAB}, \omega \Big)$. Адаптивный критик реализован в виде ИНС с архитектурой, подобной ИНС нейросетевой модели:

$$\mathbf{N}_{31} = 2$$
: $\mathbf{W}_{31} imes \mathbf{W}_{31} imes \mathbf{W}_{32} imes \mathbf{W}_{31} imes \mathbf{W}_{32} imes \mathbf{W}_{32}$

Блок адаптации обеспечивает параметрическую настройку (обучение) ИНС нейроконтроллера, модели и адаптивного критика путем настройки соответствующих матриц весовых коэффициентов и векторов смещений нейронов.

Целью обучения нейроконтроллера является формирование таких управляющих воздействий ГСУ, которые бы способствовали уменьшению квадратичного значения оценки функционала качества управления:

$$E_{NC} = 2^{-1} \hat{\mathbf{J}}_{SV\mu}^2 \rightarrow \min.$$

Обучение производится с использованием сигнала подкрепления, полученного путем обратного распространения ошибки через нейронные сети адаптивного критика и модели. Коррекция параметров ИНС нейроконтроллера осуществляется согласно выражениям:

$$\mathbf{W}_{1i}(k+1) = \mathbf{W}_{1i}(k) + \Delta \mathbf{W}_{1i}(k);$$

 $\mathbf{B}_{1i}(k+1) = \mathbf{B}_{1i}(k) + \Delta \mathbf{B}_{1i}(k), i = \overline{1, 3},$

$$\begin{split} \Delta \mathbf{W}_{1i}(k) &= \mathbf{v}_{NC} \Delta \mathbf{W}_{1i}(k-1) - \\ &- \lambda_{NC} (1 - \mathbf{v}_{NC}) \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{W}_{1i}} \bigg|_{\mathbf{W}_{1i} = \mathbf{W}_{1i}(k)}; \\ &\Delta \mathbf{B}_{1i}(k) = \mathbf{v}_{NC} \Delta \mathbf{B}_{1i}(k-1) - \\ &- \lambda_{NC} (1 - \mathbf{v}_{NC}) \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{1i}} \bigg|_{\mathbf{B}_{1i} = \mathbf{B}_{1i}(k)}; \\ &\frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{13}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial \overline{\epsilon}} = \\ &= \left\{ \begin{aligned} \mathbf{W}_{21}^{\mathrm{T}} \bigg(\mathbf{W}_{22}^{\mathrm{T}} \bigg\{ \mathbf{W}_{31}^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_{32}^{\mathrm{T}} \hat{\mathbf{J}}_{SV\mu} * \Big(1 - \mathbf{N}_{31}^2 \Big) \Big\}_{1,2} \right) * \\ &* \Big(1 - \mathbf{N}_{21}^2 \Big) \end{aligned} \right\}_{1}; \\ &\frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{12}} = \mathbf{W}_{13}^{\mathrm{T}} \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{13}} * \Big(1 - \mathbf{N}_{12}^2 \Big); \\ &\frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{11}} = \mathbf{W}_{12}^{\mathrm{T}} \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{12}} * \Big(1 - \mathbf{N}_{11}^2 \Big); \end{aligned}$$

$$\begin{split} &\frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{W}_{13}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{13}} \mathbf{N}_{12}^{\mathrm{T}}; \ \, \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{W}_{12}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{12}} \mathbf{N}_{11}^{\mathrm{T}}; \\ &\frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{W}_{11}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial \mathbf{B}_{11}} \Big[\bar{\hat{M}}_{GSU.zd} \quad \bar{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_{TAB} \quad \bar{\hat{\boldsymbol{\omega}}} \Big]; \end{split}$$

 λ_{NC} — коэффициент скорости обучения ИНС нейроконтроллера; \mathbf{v}_{NC} — коэффициент инерционности обучения. В приведенных выражениях символ «*» обозначает поэлементное умножение векторов, запись « $\{\bullet\}_i$ » — i-й элемент вектора, возведение вектора в квадрат предполагает поэлементное выполнение данной операции.

Целью обучения нейросетевой модели является уточнение прогнозов параметров состояния системы на следующем шаге управления:

$$egin{aligned} E_{MD}(k) = \ &= rac{1}{2} \Biggl[\left[rac{ar{\hat{M}}_{DVS}(k)}{ar{\hat{ heta}}_{TAB}(k+1)}
ight] - \left[rac{ar{M}_{DVS}(k)}{ar{ heta}_{TAB}(k+1)}
ight]^2
ightarrow ext{min,} \end{aligned}$$

где \overline{M}_{DVS} , $\overline{\theta}_{TAB}$ — нормированные значения эффективного крутящего момента ДВС и степени заряженности ТАБ.

Обучение ИНС модели производится методом обратного распространения ошибки. При этом коррекция параметров ИНС осуществляется согласно выражениям:

$$\mathbf{W}_{2i}(k+1) = \mathbf{W}_{2i}(k) + \Delta \mathbf{W}_{2i}(k);$$

 $\mathbf{B}_{2i}(k+1) = \mathbf{B}_{2i}(k) + \Delta \mathbf{B}_{2i}(k); i = \overline{1, 2},$

где

$$\begin{split} \Delta \mathbf{W}_{2i}\left(k\right) &= \mathbf{v}_{MD} \Delta \mathbf{W}_{2i}\left(k-1\right) - \\ &- \lambda_{MD}\left(1 - \mathbf{v}_{MD}\right) \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{W}_{2i}} \bigg|_{\mathbf{W}_{2i} = \mathbf{W}_{2i}(k)}; \\ \Delta \mathbf{B}_{2i}\left(k\right) &= \mathbf{v}_{MD} \Delta \mathbf{B}_{2i}\left(k-1\right) - \\ &- \lambda_{MD}\left(1 - \mathbf{v}_{MD}\right) \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{B}_{2i}} \bigg|_{\mathbf{B}_{2i} = \mathbf{B}_{2i}(k)}; \\ \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{B}_{22}} \bigg|_{\mathbf{B}_{22} = \mathbf{B}_{22}(k)} &= \left[\frac{\bar{M}}{\partial DVS}(k)\right] - \left[\frac{\bar{M}}{\partial TAB}(k+1)\right] - \left[\frac{\bar{M}}{\partial TAB}(k+1)\right]; \\ \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{B}_{21}} &= \mathbf{W}_{22}^{\mathbf{T}} \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{B}_{22}} \div \left(1 - \mathbf{N}_{21}^{2}\right); \\ \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{W}_{21}} &= \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{B}_{21}} \mathbf{N}_{21}^{\mathbf{T}}; \\ \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{W}_{21}} &= \frac{\partial E_{MD}}{\partial \mathbf{B}_{21}} \left[\overline{\epsilon} \quad \overline{\mathbf{x}} \quad \bar{M}_{GSU.zd}\right]; \end{split}$$

 λ_{MD} и ν_{MD} – коэффициенты скорости и инерционности обучения ИНС модели соответственно.

Обучение адаптивного критика заключается в том, чтобы итеративно уточнять оценку функционала качества управления $\hat{\mathbf{J}}_{SVII}$.

Выражение для функционала качества управления на k-м шаге может быть записано в виде

$$\begin{split} \mathbf{J}_{SV\mu}\!\left(k\right) &= \sum_{j=0}^{\infty} \mu^{j} \sum_{i=1}^{4} \mathbf{K}_{P.i} \cdot \mathfrak{I}_{i}\!\left(k+j\right) = \\ &= \sum_{i=1}^{4} \mathbf{K}_{P.i} \cdot \mathfrak{I}_{i}\!\left(k\right) + \mu \cdot \mathbf{J}_{SV\mu}\!\left(k+1\right). \end{split}$$

Предположим, что функции $V_{zd} = V_{zd}(k)$ и $\alpha = \alpha(k)$, $k = \overline{0, N-1}$, определяющие тягово-скоростной режим ГСУ, являются близкими к эргодическим. В этом случае ошибку адаптивного критика можно представить в виде ошибки временной разности [8, 9]:

$$\begin{split} &\delta\!\left(k\right) \!=\! \hat{\mathbf{J}}_{SV\mu}\!\left(k\right) \!-\! \sum_{i=1}^{4} \!\mathbf{K}_{P,i} \mathfrak{I}_{i}\!\left(k\right) \!-\! \mu \hat{\mathbf{J}}_{SV\mu}\!\left(k\!+\!1\right) \!=\\ &=\! \hat{\mathbf{J}}_{SV\mu}\!\left(k\!-\!1\right) \!-\! \sum_{i=1}^{4} \!\mathbf{K}_{P,i} \mathfrak{I}_{i}\!\left(k\!-\!1\right) \!-\! \mu \hat{\mathbf{J}}_{SV\mu}\!\left(k\right). \end{split}$$

Коррекция параметров ИНС адаптивного критика осуществляется из условия минимизации квадратичной ошибки $E_{KR} = 2^{-1} \delta^2 \to \min$ согласно выражениям:

$$\mathbf{W}_{3i}(k+1) = \mathbf{W}_{3i}(k) + \Delta \mathbf{W}_{3i}(k);$$

 $\mathbf{B}_{3i}(k+1) = \mathbf{B}_{3i}(k) + \Delta \mathbf{B}_{3i}(k), i = \overline{1, 2},$

где

$$\begin{split} \Delta\mathbf{W}_{3i}(k) &= \mathbf{v}_{KR} \Delta\mathbf{W}_{3i}(k-1) - \\ &- \lambda_{KR}(1 - \mathbf{v}_{KR}) \frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{W}_{3i}} \bigg|_{\mathbf{W}_{3i} = \mathbf{W}_{3i}(k)}; \\ \Delta\mathbf{B}_{3i}(k) &= \mathbf{v}_{KR} \Delta\mathbf{B}_{3i}(k-1) - \\ &- \lambda_{KR}(1 - \mathbf{v}_{KR}) \frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{B}_{3i}} \bigg|_{\mathbf{B}_{3i} = \mathbf{B}_{3i}(k)}; \\ &\frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{B}_{32}} \bigg|_{\mathbf{B}_{32} = \mathbf{B}_{32}(k)} = \delta(k); \\ &\frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{B}_{31}} = \mathbf{W}_{32}^{\mathrm{T}} \frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{B}_{32}} * \left(1 - \mathbf{N}_{31}^{2}\right); \\ &\frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{W}_{32}} = \frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{B}_{32}} \mathbf{N}_{31}^{\mathrm{T}}; \\ &\frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{W}_{31}} \bigg|_{\mathbf{W}_{31} = \mathbf{W}_{31}(k)} = \\ &= \frac{\partial E_{KR}}{\partial \mathbf{B}_{31}} \bigg|_{\mathbf{B}_{31} = \mathbf{B}_{31}(k)} \left[\hat{M}_{GSU.zd}(k) \quad \hat{\theta}_{TAB}(k+1) \quad \bar{\omega}(k) \right]; \end{split}$$

Таблица 1
Параметры, характеризующие качество управления ГСУ при использовании предварительно обученного нейроконтроллера

Параметр	Ездовой цикл			
	MNEDC	UDC	FTP-75	10-15 Mode
Удельный расход топлива на 1 км пути $(S_{Gt,u})$, кг/км	0,0486	0,0468	0,0471	0,0422
Удельная эмиссия окислов азота на 1 км пути $(S_{NOx.u})$, г/км	0,165	0,104	0,147	0,148
Удельная эмиссия оксида углерода на 1 км пути $(S_{CO,u})$, г/км	3,353	5,464	3,193	2,755
Удельная эмиссия углеводородов на 1 км пути $(S_{HC.u})$, г/км	0,209	0,174	0,194	0,191

 λ_{KR} и ν_{KR} — коэффициенты скорости и инерционности обучения ИНС адаптивного критика соответственно.

Таким образом, на каждом шаге улучшается закон управления путем обучения нейроконтроллера, а также повышается способность системы оценивать текущую ситуацию вследствие обучения ИНС адаптивного критика и модели. Коррекция параметров нейронных сетей продолжается до тех пор, пока не будет достигнут минимум функционала качества управления $\mathbf{J}_{SV\mu}$ либо получена приемлемая стратегия управления для заданного ездового цикла.

ИНС нейроконтроллера, модели и адаптивного критика могут быть инициализированы случайными значениями весовых коэффициентов и смещений нейронов, равномерно распределенными в диапазоне [-1, 1]. В этом случае допустимые управления на начальном этапе адаптации при произвольных задающих и возмущающих воздействиях гарантируются учетом ограничений области допустимых режимов в регуляторе ГСУ $\mathbf{u} = f_{GSU.rg} \left(arepsilon, M_{GSU.zd}, V
ight)$. Однако для ускорения адаптации целесообразно провести предварительное офлайн-обучение нейроконтроллера и нейросетевой модели с использованием эталонной модели управления. В качестве эталонной модели может выступать управление с использованием логических правил выбора стратегии.

Результаты экспериментальных исследований

Для исследования эффективности предложенного способа адаптивного управления проведена серия вычислительных экспериментов с моделью гибридного ТС массой 2100 кг с параллельной схемой ГСУ, включающей ДВС с максимальной эффективной мощностью 43,7 кВт, тяговый электропривод на основе ВЭД с максимальной мощностью 64 кВт и ТАБ с номинальной емкостью 6,5 А·ч.

Изучалась работа САУ ГСУ на европейском (MNEDC – Modified New European Driving Cycle), городском европейском (UDC – Urban Driving Cycle), североамериканском (FTP-75 –

Federal Test Procedure) и японском (10–15 Mode) ездовых циклах.

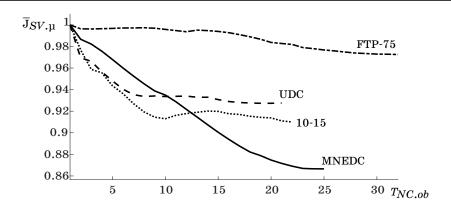
Предварительное обучение нейроконтроллера, входящего в состав адаптивного регулятора, осуществлялось с использованием массива экспериментальных данных, полученных в результате моделирования движения ТС по ездовому циклу MNEDC при управлении ГСУ на основе логических правил при различных начальных значениях степени заряженности ТАБ $\theta_{TAB.0} \in [0,4,~0,8]$. Затем на том же ездовом цикле производилось предварительное обучение нейросетевой модели при управлении ГСУ, определяемом нейроконтроллером.

Параметры, характеризующие качество управления ГСУ при использовании предварительно обученного нейроконтроллера без использования адаптации к особенностям ездового цикла, приведены в табл. 1.

При выполнении вычислительных экспериментов в процессе исследования эффективности адаптивного управления ГСУ использовались следующие параметры алгоритма адаптации: $\mu = 0.9$; $v_{NC} = v_{KR} = 0.1$; коэффициенты скорости обучения нейроконтроллера и адаптивного критика задавались индивидуально для каждого ездового цикла из условия обеспечения длительности обучения $T_{NC,ob}$ порядка 20–30 эпох: $\lambda_{NC} = 10^{-6}$, $\lambda_{KR} = 0{,}002$ (MNEDC), $\lambda_{NC} = 8{,}0\cdot10^{-5}$, $\lambda_{KR} = 4{,}0\cdot10^{-4}$ (UDC), $\lambda_{NC} = 2{,}0\cdot10^{-6}$, $\lambda_{KR} = 5{,}0\cdot10^{-5}$ (FTP-75), $\lambda_{NC} = 2{,}0\cdot10^{-5}$, $\lambda_{KR} = 0{,}003$ (10–15 Mode). Под эпохой обучения понимается преодоление автомобилем соответствующего ездового цикла. Дообучение ИНС модели в процессе адаптации не применялось, поскольку показало свою низкую эффективность при условии хорошего качества ее предварительного обучения.

На рис. 4 показано изменение нормированного удельного (то есть отнесенного к количеству шагов процесса управления) значения функционала качества управления ($\overline{\mathbf{J}}_{SV,\mu}$) в процессе обучения нейроконтроллера.

Параметры, характеризующие качество управления ГСУ на различных ездовых циклах



Puc. 4. Изменение нормированного удельного значения функционала качества управления ГСУ в процессе обучения нейроконтроллера

. Tаблица 2 Параметры, характеризующие качество управления ГСУ по завершении процесса адаптации

Параметр	Ездовой цикл			
	MNEDC	UDC	FTP-75	10-15 Mode
$oxed{f У}$ дельный расход топлива на 1 км пути $(S_{Gt.u})$, кг/км	0,0416	0,0342	0,0464	0,0370
удельная эмиссия окислов азота на 1 км пути $(S_{NOx.u})$, г/км	0,102	0,0355	0,136	0,0943
удельная эмиссия оксида углерода на 1 км пути $(S_{CO.u})$, г/км	2,538	3,778	2,805	1,763
Удельная эмиссия углеводородов на 1 км пути $(S_{HC.u})$, г/км	0,146	0,0793	0,185	0,122

по окончании процесса адаптации, приведены в табл. 2.

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что наилучшая эффективность адаптации управления ГСУ к изменяющемуся режиму движения соответствует ездовым циклам UDC и 10-15 Mode, которые не содержат загородных этапов движения. Однородность тягово-скоростного режима позволяет САУ ГСУ точнее определить сигнал подкрепления, который используется для обучения нейроконтроллера. Высокая эффективность адаптации наблюдается также на ездовом цикле MNEDC, который использовался для предварительного обучения нейроконтроллера и нейросетевой модели. Существенно меньшую эффективность система адаптивного управления имеет на ездовом цикле FTP-75, включающем два участка, имитирующих движение по пригородным магистралям.

Таким образом, применение адаптивного управления ГСУ с использованием нейросетевого адаптивного критика позволяет преодолеть недостаток априорной информации о параметрах ездового цикла и рельефа подстилающей поверхности, а также низкую точность математических моделей гибридного автомобиля за счет более полного использования текущей информации. Данный подход предполагает адаптацию управления ГСУ к тягово-скоростному режиму

движения автомобиля на основе концепции обучения нейронных сетей с подкреплением.

В процессе адаптации управления ГСУ средний удельный расход топлива сокращается на $1.5 \div 26.9\%$, удельная эмиссия оксидов азота на $7.5 \div 65.9\%$, оксида углерода на $12.2 \div 36.0\%$ и углеводородов на $4.6 \div 54.4\%$ в зависимости от текущего ездового цикла. Наибольшая эффективность адаптации соответствует городскому режиму движения, где наиболее полно проявляются преимущества гибридных ТС.

Библиографический список

- 1. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Сєріков и т. д. Харків: ХНАДУ, 2011. 236 с.
- 2. Сериков С. А., Бороденко Ю. Н., Дзюбенко А. А. Использование логических правил при выборе стратегии управления силовой установкой гибридных автомобилей // Мир транспорта и технологических машин. 2014. № 3. С. 23–34.
- 3. Dorri M. and Shamekhi A. Design of an Optimal Control Strategy in a Parallel Hybrid Vehicle in Order to Simultaneously Reduce Fuel Consumption and Emissions // SAE Technical Paper. 2011.

- 4. Сериков С. А., Бороденко Ю. Н., Дзюбенко А. А. Использование методов адаптации при управлении силовой установкой гибридных автомобилей // Мир транспорта и технологических машин. 2014. № 4 (47). С. 27–38.
- 5. Zhang Yi, Liu Heping, Wang Huabin. Torque Control Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles using Fuzzy Logic // WSEAS Transactions on Systems. Iss. 4. Vol. 10. 2011. Pp. 116–125.
- 6. Serikov S. A. Neural Networks and Fuzzy Logic Control System of Hybrid Vehicle Power Unit // Journal of Automation and Information Sciences. Begell House, Inc. (USA) '2014. Vol. 46. Issue 4. P. 38–59.
- 7. Сериков С. А. Нейросетевое управление гибридной силовой установкой на основе метода адаптивной критики // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Харьков: ХНАДУ, 2012. Вып. 30. С. 65–74.
- 8. *Редько В. Г., Прохоров Д. В.* Нейросетевые адаптивные критики // Научная сессия МИ-ФИ-2004. Ч. 2. Нейроинформатика-2004. С. 77—84.

- 9. Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Ronald G. Harley, Donald C. Wunsch. Implementation of Adaptive Critic-Based Neurocontrollers for Turbogenerators in a Multimachine Power System // IEEE Transactions on Neural Networks. 2003, Sept. Vol. 14. No. 5. Pp. 1047–1064.
- 10. Серикова Е. А., Сериков С. А. Нейросетевая аппроксимация характеристик двигателя внутреннего сгорания // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. № 4 (252). С. 70–79.
- 11. Сериков С. А. Модель тягового электропривода автомобиля на основе вентильного двигателя // Управляющие системы и машины. 2010. \mathbb{N} 5. С. 27–33.
- 12. Сериков С. А. Идентификация математической модели тяговой аккумуляторной батареи гибридного автомобиля // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Харьков: ХНАДУ, 2010. Вып. 26. С. 23–30.

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 519.8

Б. В. Соколов*

доктор технических наук, профессор

С. А. Потрясаев*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

А. С. Гниденко*

аспирант

*ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН)

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОСТАВОВ, ВХОДЯЩИХ В ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКУЮ СЕТЬ

В статье рассматривается задача комбинированного планирования функционирования (движения и погрузки/разгрузки) группы железнодорожных составов, входящих в единую логистическую сеть. Проанализированы основные аспекты данной проблемы, а также недостатки классических подходов теории расписаний применительно к рассматриваемой задаче. Предложен оригинальный подход к пространственновременной декомпозиции рассматриваемой задачи комплексного моделирования и планирования функционирования рассматриваемой группы сложных организационно-технических объектов, базирующийся на использовании комбинированных методов (метод Флойда, метод локальных сечений Болтянского В. Г, метод ветвей и границ) для решения указанной нестационарной задачи теории расписаний.

Ключевые слова: комплексное моделирование, планирование, оптимальное управление.

B. V. Sokolov*

Dr. Sc., Tech., Professor

S. A. Potryasaev*

PhD, Tech., Senior Researcher

A. S. Gnidenko*

PhD Student

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS

COMPLEX MODELLING AND COMBINED METHODS OF PLANNING THE FUNTIONING OF TRAINS WITHIN THE TRANSPORT AND LOGISTICS NETWORK

The article considers the problem of combined scheduling the motion of trains in a single logistics network. Analyzed the main aspects of the problem and the shortcomings of the classical approaches of the theory of schedules in relation to the problem at hand. An original approach to the space-time decomposition of the problem of complex modeling and planning of the functioning of the complex organizational and technical objects group under consideration is based on the use of combined methods (the Floyd method, the Boltyanskii method of local sections, the branch and boundary method) for solving this non-stationary problem the theory of schedules.

Keywords: complex modeling, planning, optimal control.

К настоящему времени разработано большое число алгоритмов, предназначенных для решения сложных задач теории расписаний большой размерности. При этом если размерность

исходной задачи теории расписаний велика, то при применении традиционных методов математического программирования возникают значительные вычислительные трудности [1–3].

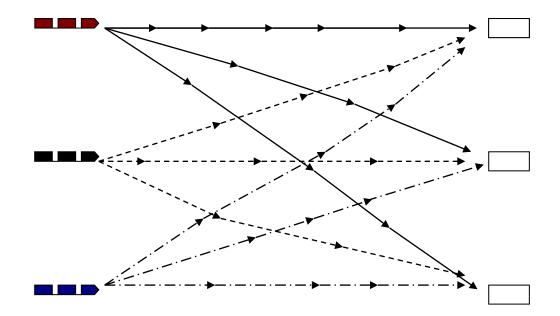
В статье предложен оригинальный подход к пространственно-временной декомпозиции и решению рассматриваемого класса задач комплексного моделирования и планирования группового функционирования (движения и погрузки/разгрузки) железнодорожных составов (ЖС) и логистических центров (ЛЦ), представляющих собой сложные организационно-технические объекты. Данный подход базируется на использовании комбинированных моделей и методов (метод Флойда, метод локальных сечений Болтянского В. Г, метод ветвей и границ) для решения указанной нестационарной задачи теории расписаний большой размерности. Приводятся предварительные сведения о реализации разработанного модельно-алгоритмического обеспечения.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу планирования расписания на примере трех ЖС (рис. 1), каждый из которых потенциально может доставить универсальный груз на любую из заданных трех станций с расположенными на них логистическими центрами. Определены топология и характеристики каждого участка железнодорожной сети, технические характеристики ЖС, ограничения, связанные с невозможностью нахождения одно-

временно на одном участке пути и на одной станции нескольких ЖС. Кроме того, предполагается, что каждый ЖС может назначаться только на одну из трех станций. Каждая станция в каждый момент времени может принять только один ЖС. Необходимо составить такое расписание движения, чтобы каждый из ЖС доставил груз на одну из станций, а суммарный штраф за нарушение директивных сроков доставки и разгрузки всех грузов для всех ЖС на заданном временном интервале (интервале планирования работ) был минимальный. На рис. 1 представлен общий вид исследуемой транспортно-логистической сети.

Для решения сформулированной нестационарной задачи теории расписаний большой размерности был предложен следующий оригинальный вариант ее пространственно-временной декомпозиции. На первом этапе осуществляется планирование движения железнодорожного состава (ЖС) с учетом конкретных характеристик и ограничений (пространственных, технических, технологических) на конкретных участках путей, соединяющих начальные точки нахождения ЖС с соответствующими станциями. При этом применительно к рассматриваемой задаче комплексного планирования необходимо обеспечить максимально точное планирование



$$x_{21}^{(2)} \ x_{22}^{(2)} \ x_{23}^{(2)} \ ; \ x_{31}^{(3)} \ x_{32}^{(3)} \ x_{33}^{(3)}$$

и предсказание времени прохождения каждым ЖС каждого отдельного участка с учетом известных его характеристик.

Расчет движения отдельного ЖС от начальной точки, где он находится в начале интервала планирования, до заданной станции является самостоятельной вариационной задачей с закрепленными граничными условиями, которая содержит ограничения на фазовые координаты и управление.

Основными показателями качества планирования в рамках данной подзадачи являются обеспечение заданного времени хода и минимум расхода электроэнергии на тягу. После решения данной задачи наступает второй этап решения общей задачи планирования движения ЖС — этап генерирования возможных вариантов перемещения каждым ЖС из точки стояния до каждой из станций прибытия.

И, наконец, на третьем этапе решения первых двух этапов передаются в динамическую координационную модель планирования совместного движения ЖС, в рамках которой разрешаются все возможные конфликтные ситуации, связанные с пересечением маршрутов ЖС, которые не были рассчитаны в рамках статической модели. На заключительном этапе при групповом планировании добавляется учет временного фактора, а также самого процесса погрузки/загрузки ЖС на станциях. Перейдем к описанию всех перечисленных этапов решения задачи.

Модельно-алгоритмическое обеспечение расчета движения одного железнодорожного состава

Для решения данной задачи предлагается использовать динамическую модель и алгоритм, позволяющий соблюсти ограничения и обеспечить минимум показателям заданного времени хода и минимум расхода электроэнергии на тягу для конкретных участков, входящих потенциально в маршрут движения каждого ЖС. В используемой для решения задачи динамической модели движение ЖС описывается следующей системой дифференциальных уравнений по координате s[4]:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{v} [u_f f(v) - u_r r(v) - u_b b(v) - w(v) - g(s)];$$

$$\frac{du}{ds} = \frac{1}{t_{cov}v}; \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v},$$

где u_f, u_r, u_b — коэффициенты тяги рекуперативного и механического торможения, учитывающие текущее положение контроллера тя-

ги;
$$f(v) = k_f \frac{\xi g F(v) n_c}{M n_B}$$
 — максимальная удельная сила тяги; $f(v) = k_r \frac{\xi g R(v) n_c}{M n_B}$ — макси-

мальная удельная сила рекуперативного тор-

можения;
$$b(v) = k_b \frac{\xi g B(v) n_c}{M}$$
 — максимальная

удельная сила механического торможения;

$$w(v) = k_w \, rac{\xi g W(v) n_c}{M} \, - \,$$
удельное основное сопро-

тивление движению поезда; M — масса поезда; ξ — коэффициент, учитывающий инерции вращающихся масс; F(v) — максимальная сила тяги одной тяговой секции в зависимости от скорости; R(v) — максимальная сила рекуперативного торможения одной тяговой секции; B(v) — максимальная сила механического торможения одного вагона; $W(v)=k_0+k_1v+k_2v^2$ — основное сопротивление движению одного вагона; k_0 , k_1 , k_2 — коэффициенты основного сопротивления.

Параметры, описывающие массоразмерные характеристики ЖС, коэффициенты сил для составляющих управления, а также коэффициенты сопротивления, являются настраиваемыми величинами, подлежащими калибровке для обеспечения соответствия модели конкретному поезду. Помимо основного сопротивления движению модель учитывает дополнительное сопротивление g(s), зависящее от уклона железнодорожного полотна, при этом движение на сопрягающих элементах профиля не учитывается. Выражение для дополнительного сопротивления движению от уклонов, основанное на представлении поезда в виде нерастяжимой нити, имеет вид

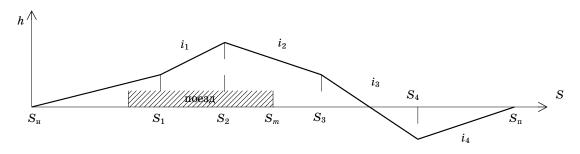


Рис. 2. График уклона железнодорожного полотна для расчета дополнительных сил сопротивления

$$g(s) = \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{i_j l_j}{n_B L}.$$

На рис. 2 показан принцип расчета дополнительных сил сопротивления при прохождении участка, содержащего уклон.

Основная система дифференциальных уравнений содержит переменную для управления и, что позволяет учесть инерцию органов управления при переключении между режимами движения. Для простоты зависимость принята линейной по времени, что хорошо отражает механику органов управления реального поезда.

Описанная математическая модель ЖС используется для решения основной задачи модельно-алгоритмического обеспечения для расчета его движения — построения оптимального плана перемещения от начальной точки до заданной станции. Данная задача является задачей оптимального управления с закрепленными концами. Оптимальная траектория обеспечивает соблюдение ограничений скорости и выполнение заданного времени хода при минимизации расходов электроэнергии.

Движение состава по перегону до конечной станции осуществляется в следующих пяти режимах: режим тяги, режим стабилизации, режим выбега, режим рекуперативного торможения и режим полного механического торможения. Электроэнергия расходуется в режиме тяги при ускорении поезда, а также в случае стабилизации для компенсации сил сопротивления и поддержания существующей скорости. На рис. 3 представлен пример построенного оптимального плана движения ЖС.

Для поиска оптимальной точки перехода в режим выбега используется уравнение для вспомогательной переменной p(s), решаемое совместно с уравнениями движения поезда [4]:

$$\frac{dp}{ds} = \frac{1 - p}{v} u_f \frac{\partial f(v)}{\partial x} + \frac{p - \eta}{v} u_r \frac{\partial r(v)}{\partial x} - \frac{p}{v} u_b \frac{\partial b(v)}{\partial x} - \frac{p}{v} \frac{\partial w(v)}{\partial x} - \frac{\lambda}{v^3}.$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа, $\eta = \eta_m \eta_p$ — коэффициент возврата энергии рекуперации в сеть, η_m , η_p — к. п. д. тяговой секции в режимах тяги и рекуперации соответственно. Для функции p(s) можно выделить ряд диапазонов с различными управляющими воздействиями, каждому из которых соответствует определенный оптимальный режим управления поездом.

Ввиду того что основным показателем качества плана является обеспечение заданного времени хода, оптимальная траектория может содержать только режимы полной тяги, стабилизации и торможения, что обеспечит минимально возможное время прибытия за счет потери плавности хода и увеличения расходов электроэнергии. Для случая коротких перегонов при наличии опоздания возможен переход из тяги непосредственно в режим механического торможения. Применение принципа максимума Л. С. Понтрягина позволяет путем итерационного приближения определить требуемую установившуюся скорость и точки перехода между режимами для обеспечения заданного времени хода [5]. Поскольку построение плана движения конкретного ЖС является подзадачей в рамках комплексного планирования группы ЖС, то при планировании движения одного поезда возможно появление ограничений скорости, соблюдение которых позволит избежать конфликтов с другими составами при прохождении перегона. Поэтому оптимальная траектория строится с учетом произвольного набора ограничений скорости, задаваемых на вход. На рис. 4 показан пример такой траектории, учитывающей заданное ограничение.

Статическая модель планирования движения каждого отдельного железнодорожного состава

Предполагается, что рассматриваемая железнодорожная сеть и соответствующие складские помещения на станциях назначения снабжены территориально-распределенной системой радиочастотной идентификации (RFID-система), вклю-

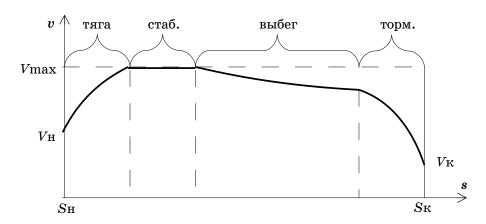


Рис. 3. Оптимальная траектория, включающая режимы тяги, стабилизации, выбега и торможения

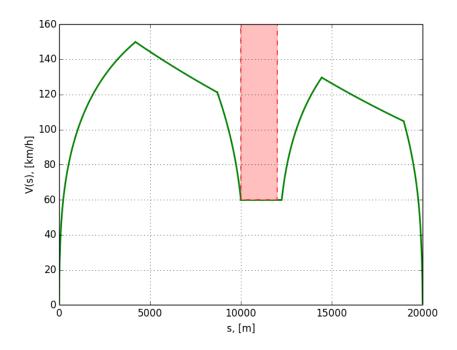


Рис. 4. Оптимальная траектория движения отдельного ЖС, учитывающая ограничение скорости на перегоне

чающей в себя распределенную систему стационарных ридеров, обеспечивающих дистанционное считывание информации о движении поездов и состоянии соответствующих грузов, с использованием установленных на них пассивных, полуактивных либо активных меток [6].

Принцип построения систем радиочастотной идентификации заключается в следующем. На объекте мониторинга (поезде) размещается активная (имеется встроенный источник питания) или пассивная RFID-метка. Главная функциональная особенность этих меток состоит в том, что в каждой из них содержится уникальный идентификационный код, который фактически невозможно подделать. Эти коды считываются специальными приемо-передающими устройствами — ридерами. Ридер с определенной периодичностью излучает радиосигналы, которые переизлучаются метками, оказавшимися в его электромагнитном поле.

В этих переизлученных сигналах содержится информация об идентификационных кодах RFID-меток, которые запоминаются в памяти ридера и\или передаются им в место компьютерной обработки. Ридеры могут быть переносными, стационарными и иметь различные функциональные возможности автономной обработки считанной информации. Дистанции считывания кодов меток на сегодняшний день составляют от нескольких сантиметров до 10–20 метров в зависимости от типов меток и используемых считывателей. Если обеспечить условия неразделимости объекта мониторинга от метки, то наличие или отсутствие ее кода в ридере однозначно будет свидетельствовать о наличии или

отсутствии самого объекта в пространственной зоне радиочастотного контроля. В этом случае при перемещении объекта мониторинга с индивидуальной RFID-меткой в рабочей зоне ридера может быть определен факт и время его нахождения в указанной зоне. Кроме того, при совместном использовании технологий RFID и технологий современной мобильной связи (беспроводной передачи информации) может быть решена задача локального позиционирования перемещающихся объектов и управления ими в реальном масштабе времени (рис. 5).

В СПИИРАН в период с 2014 года по настоящее время проводятся работы по созданию соответствующего имитационно-моделирующего стенда (см. рис. 5), на котором осуществлялась проверка решения рассматриваемой в данной статье транспортно-логистической задачи. На основе созданной железнодорожной сети было проведено ее разбиение на участки. На концах участков установлены ридеры. Расстояния между ридерами считаются заданными. Для построения статической модели движения ЖС каждому такому участку сопоставим некоторую технологическую операцию (TexO). Процесс прохождения ЖС A_i участка пути, ограниченный двумя ридерами, назовем процессом выполнения заданной ТехО. Перенумеруем все ТехО, присваивая им номера у. Начальному местоположению поезда A_i , который планируется для перемещения в сторону станции B_i , будет соответствовать операция, где $x_{i\chi}^{(j)}$ – условное обозначение операции движения поезда A_i к станции B_i по пути, состоящем из участков χ (либо разгрузки поезда A_i на станции B_i).

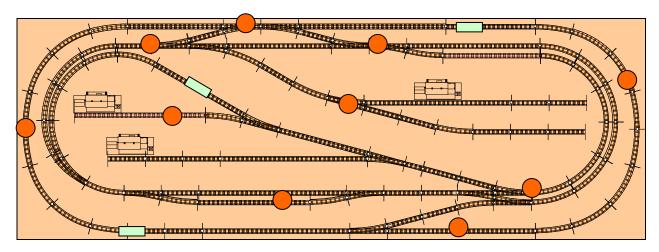


Рис. 5. Модель транспортно-железнодорожной логистической сети:
— условное обозначение поезда;
— условное обозначение ридера

Таким же способом определим местоположение каждой станции B_j . Найдем кратчайшие расстояния от начального местоположения поезда A_i до каждой станции B_j в отдельности. Поиск кратчайших путей на железнодорожной сети будем осуществлять с помощью стандартного алгоритма Флойда [1–2]. Сгенерированные с помощью алгоритма Флойда варианты перемещения каждого ЖС в дальнейшем будем использовать в динамической координационной модели планирования совместного функционирования указанных ЖС.

Динамическая модель планирования движения группы поездов

Формализацию поставленной задачи расписаний проведем, используя динамическую интерпретацию процесса выполнения TexO [7–10]. Рассмотрим математическую модель выполнения комплекса операций $D^{(i)}$. Для этого введем

неотрицательную величину
$$x_i = \sum_{\chi=1}^{S_j} x_{i\chi}^{(j)}, \forall j,$$
 ко-

торую будем называть состоянием данной TexO (операция перемещения $\Re C$ и его разгрузки). Изменение состояния TexO $D_\chi^{(i)}$ в каждый момент времени определяется дифференциальным уравнением

$$\dot{x}_{i} = \sum_{j=1}^{3} \sum_{\chi=1}^{S_{j}} \omega_{i\chi}^{(j)}(t) u_{i\chi}^{(j)}, \tag{1}$$

где $\omega_{i\chi}^{(j)}(t)$ — нормированные интенсивности выполнения операций, которые получаются после обработки результатов решения задачи планирования движения ЖС на предыдущих этапах ее решения (см. п. 1 и п. 2 данной статьи), $u_{i\chi}^{(j)} \in \{0,1\}$ — управляющее воздействие ($u^{(j)}=1$, если i-й ЖС выполняет ТехО $D_{\chi}^{(i)}$, $u_{i\chi}^{(j)}=0$ в противоположном случае), t — текущий момент времени; $t \in \sigma = \left(t_0, t_f\right]$ — интервал планирования,

 $t_0(t_f)$ — начальный (конечный) момент времени интервала σ . Наряду с (1) введем дифференциальные уравнения

$$y_i^{(j)} = \sum_{\chi=1}^{S_j} u_{i\chi}^{(j)},$$
 (2)

с помощью которых можно оценить общее время движения A_i -го ЖС к B_j -й станции, а также выполнения на ней соответствующих логистических операций (ЛО). В (2) $y_i^{(j)}(t)$ — переменная, которая характеризует общую продолжительность движения поезда к B_j -й станции и выполнения на ней ЛО. Чтобы учесть требование неразрывного выполнения ТехО, введем в модель планирования дополнительные дифференциальные уравнения и ограничения

$$\begin{array}{l}
\bullet^{(j)} \\
z_{i\chi} = u_{i\chi}^{(j)},
\end{array} \tag{3}$$

$$h_{i\chi} = z_{i\chi}^{(j)}, \qquad (4)$$

$$g_{i\chi} = v_{i\chi}^{(j)}, \qquad (5)$$

$$v_{i\chi}^{(j)} \left(a_{i\chi}^{(j)} - z_{i\chi}^{(j)} \right) = 0, \gamma_{i\chi}^{(j)} \in \{0,1\},$$
 (6)

где $z_{i\chi}^{(j)}$ — переменная, которая равна времени выполнения ТехО $D_{\chi}^{(i)}$, связанной с A_i -м ЖС; $h_{i\chi}^{(j)}$ — площадь под интегральной кривой $z_{i\chi}^{(j)}$; $g_{i\chi}^{(j)}$ — вспомогательная переменная, значение которой численно равно времени $t_{i\chi}^{/(j)}$ от момента окончания выполнения ТехО $D_{\chi}^{(i)}$ A_i -м ЖС до момента t_f . В (6) $a_{i\chi}^{(j)}$ — заданное время выполнения ТехО $D_{\chi}^{(i)}$. Из соотношения (6) и (11) следует, что $v_{i\chi}^{(j)}(t)$ = 1 только в том случае, когда работа $D_{\chi}^{(i)}$ выполнена до конца, то есть $\left(a_{i\chi}^{(j)} - z_{i\chi}^{(j)}\right)$ = 0.

В соответствии с содержательной постановкой задачи в каждый момент времени каждый ЖС может перемещаться на одну из трех станций. Каждая станция в каждый момент времени может принять только один ЖС. Тогда управляющие воздействия должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\sum_{j=1}^{3} u_{i\chi}^{(j)}(t) \leq 1 \ \forall i, \forall \chi; \ \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} u_{i\chi}^{(j)} \leq 1 \ \forall \chi;$$

$$\sum_{i=1}^{3} u_{i\chi}^{(j)}(t) \leq 1 \ \forall j, \forall \chi; \ u_{i\chi}^{(j)} \in \left\{0,1\right\} \ \forall i \ \forall \chi \ \forall j.$$

$$(7)$$

Ограничения вида

$$u_{i\chi}^{(j)} \left(a_{i(\chi-1)}^{(j)} - x_{i(\chi-1)}^{(j)} \right) = 0, \forall t,$$
 (8)

определяют очередность выполнения частично-упорядоченных ТехО $D_\chi^{(i)}$, характеризующих возможные маршруты перемещения A_i -го ЖС, а также порядок выполнения ЛО [7–10]. Анализ ограничений (8) показывает, что $u_{i\chi}^{(j)}(t)=1$ может быть только в том случае, когда все операции, непосредственно предшествующие ТехО $D_\chi^{(i)}$, выполнены до конца, то есть $\left(a_{i(\chi-1)}^{(j)}-z_{i(\chi-1)}^{(j)}\right)=0, \forall t$. Введем в рассмотрение вектор управляющих воздействий

$$\overrightarrow{u} = \left\| u_{11}^{(1)} u_{11}^{(2)} \dots u_{i\chi}^{(j)} \dots u_{3S_3}^{(3)} : v_{11}^{(1)} v_{11}^{(2)} \dots v_{i\chi}^{(j)} \dots v_{3S_3}^{(3)} \right\|^T,$$

$$\overrightarrow{u} \in Q.$$

где Q — множество допустимых управляющих воздействий, удовлетворяющих заданным ограничениям (6), (7), (8). Будем предполагать, что Q принадлежит классу кусочно-непрерывных функций. Краевые условия имеют в рассматриваемой задаче вид

$$t = t_0: \ x_{i\chi}(t_0) = y_j(t_0) = z_{i\chi}^{(j)}(t_0) =$$

$$= h_{i\chi}^{(j)}(t_0) = g_{i\chi}^{(j)}(t_0) = 0, \tag{9}$$

$$t = t_f: (a_i^{(j)} - \sum_{\gamma=1}^{S_j} z_{i\chi}^{(j)}) z_{i\chi}^{(j)} = 0; \ y_j(t_f),$$
 (10)

$$z_{i\chi}^{(j)}(t_f), \ h_{i\chi}^{(j)}(t_f), \ g_{i\chi}^{(j)}(t_f) \in \Re^1.$$

Ограничения на неразрывность выполнения работы запишем в виде

$$\left\{ \left[z_{i\chi}^{(j)} g_{i\chi}^{(j)} + \frac{\left(a_{i\chi}^{(j)} \right)^2}{2} - h_{i\chi}^{(j)} \right]^2 (z_{i\chi}^{(j)})^2 \right\}_{t=t_t} = 0. \quad (11)$$

В выражении (11) величина произведения $z_{i\chi}^{(j)}g_{i\chi}^{(j)}$ численно равна площади под интегральной кривой, соответствующей решению уравнения (3) на временном интервале $\left(t_{i\chi}^{\prime(j)},t_f\right]$. Величина $\left(a_{i\chi}^{(j)}\right)^2/2$ численно равна площади под интегральной кривой, соответствующей требуемому решению уравнения (3) на интервале $\left(t,t_{i\chi}^{\prime(j)}\right)$

при условии, что TexO $D_{\chi}^{(i)}$ выполнялась A_i -м $\Re C$ без прерываний.

Из анализа (11) следует, что в том случае, когда $\text{TexO } D_{\chi}^{(i)}$ выполнялась A_i -м ЖС без прерываний, разность величин, стоящих в квадратной скобке, равна нулю. В противоположном случае данная разность отлична от нуля.

Чтобы учесть ситуации, при которых A_i -й ЖС не движется для выполнения операции $D_\chi^{(i)}$ на интервале σ , в выражение (11) введен дополнительный сомножитель $z_{i\chi}^{(j)}$, который в момент времени $t=t_0$ равен нулю (см. краевые условия (9)). Показателями качества выполнения ТехО, связанными с перемещениями ЖС и выполнением ЛО, можно выбрать следующие функциональ:

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} d\tau = t_f - t_0, \tag{12}$$

 J_1 — функционал быстродействия (общее время перемещения и разгрузки ЖС на соответствующих станциях назначения);

$$J_2 = \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} \left[(a_i^{(j)} - \sum_{\chi=1}^{S_j} z_{i\chi}^{(j)})^2 (z_{i\chi}^{(j)})^2 + \right]$$

$$+\sum_{\chi=1}^{3} \left[z_{i\chi}^{(j)} g_{i\chi}^{(j)} + \frac{\left(a_{i\chi}^{(j)} \right)^{2}}{2} - h_{i\chi}^{(j)} \right]^{2} (z_{i\chi}^{(j)})^{2}]; \qquad (13)$$

 J_2 — функционал, с помощью которого оцениваются потери из-за невыполнения всего комплекса TexO, закрепленных за ЖС, и ограничений на неразрывность операций;

$$J_3 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{t_0}^{t_f} \eta_{iS_j}^{(j)}(\tau) u_{iS_j}^{(j)}(\tau) d\tau, \tag{14}$$

 J_3 — функционал, определяющий суммарный штраф за нарушение директивных сроков при выполнении TexO, где $\eta_{ij}(\tau)$ — некоторые монотонно возрастающие функции времени, которые выбираются с учетом директивных сроков начала (либо конца) выполнения операций.

Таким образом, задача оптимального планирования перемещения и разгрузки $\frac{1}{W_{\rm C}}$ сводится к поиску допустимого управления $\frac{1}{u_{\rm G}}$, обеспечивающего для уравнений (1), (2), (3)–(5) выполнение краевых условий (9)–(11), удовлетворяющего заданным ограничениям (6), (7), (8) и доставляющего показателю качества (14) абсолютный минимум по сравнению со всеми другими управлениями, отвечающими тем же условиям и ограничениям. При этом время выполнения комплекса операций должно быть минимальным,

Можно показать [7–10], что для расширенного класса допустимых управлений $M_{\,\sigma\,p}$ (и, соответственно, для Q_p), в котором условия

 $u_{i\chi}^{(j)} \in \{0,1\}$, $v_{i\chi}^{(j)} \in \{0,1\}$ заменены на условия $u_{i\chi}^{(j)} \in [0,1]$ $v_{i\chi}^{(j)} \in [0,1]$ (см. выражение (6)), выполнены все условия теоремы существования оптимального управления (см. [11], с. 288, теорема 4, следствие 2). При этом если в классе $M_{\sigma p}$ оптимальное управление существует, то, как следует из метода локальных сечений [5], это управление в каждый момент времени $t \in \sigma$ (за

исключением точек разрыва) доставляет макси-

$$H(\overrightarrow{\psi}, \overrightarrow{x}, t, \overrightarrow{u}) = \max_{\overrightarrow{u} \in Q_{p}(x)} \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} \sum_{\chi=1}^{3} \left[\begin{pmatrix} \omega_{i\chi}^{(j)} \psi_{i} + p_{i}^{(j)} + q_{i\chi}^{(j)} - \eta_{i\chi}^{(j)} \end{pmatrix} \times \\ \times u_{i\chi}^{(j)} + \phi_{i\chi}^{(j)} v_{i\chi}^{(j)} + \gamma_{i\chi}^{(j)} z_{i\chi}^{(j)} \end{pmatrix},$$
(15)

где

$$\begin{aligned} x &= \\ &= \left\| x_1 ... x_3 \vdots z_{11}^{(1)} ... z_{3S_3}^{(3)} \vdots h_{11}^{(1)} ... h_{3S_3}^{(3)} \vdots g_{11}^{(1)} ... g_{3S_3}^{(3)} \vdots y_1^{(1)} ... y_3^{(3)} \right\|^T, \end{aligned}$$

а вектор-функция

мум гамильтониану

определяется из решения уравнений

$$\psi_{i} = -\sum_{j=1}^{3} \sum_{\chi=1}^{3} \sum_{\beta \in R_{i\chi}^{+}} \left(\omega_{i\beta}^{(j)} \phi_{i\beta}^{(j)} + p_{i}^{(j)} + q_{i\beta}^{(j)} - \eta_{i\beta}^{(j)} \right) u_{i\beta}^{(j)}, (16)$$

$$p_{i} = 0, q_{i\chi} = -\gamma_{i\chi}^{(j)} - \phi_{i\chi}^{(j)} v_{i\chi}^{(j)}, \qquad (17)$$

$$_{\bullet}(j)$$
 $_{\bullet}(j)$ $_{\gamma_{i\chi}}=0,\ \phi_{i\chi}=0;\ i=1,2,3;\ j=1,2,3;\ \chi=1,\dots,S_{j},\ (18)$ где $R_{i\chi}^{+}$ — множество операций, непосредственно следующих за операцией $D_{\chi}^{(i)}$ при выполнении условий трансверсальности [16–18].

Анализ полученных соотношений показывает, что с помощью метода локальных сечений исходная задача неклассического вариационного исчисления сводится к краевой задаче. «Динамический» приоритет каждой ТехО определяется выражением вида $\left(\omega_{i\chi}^{(j)}\psi_i+p_i^{(j)}+q_{i\chi}^{(j)}-\eta_{i\chi}^{(j)}\right)$, стоящим перед соответствующим управляющим воздействием. В данной статье «динамический» приоритет трактуется значительно шире, чем в работах [1–3], так как в его состав наряду с сопряженными переменными $\psi_{i\chi}(t)$, с помощью которых учитываются логические взаимосвязи между операциями, входят сопряженные переменные, с помощью которых учитываются требования неразрывного выполнения операций (переменные $q_{i\chi}^{(j)}$), равномерного использования ресурсов (переменные $p_i^{(j)}$). Кроме того, при вы

числении приоритета учитывается текущее значение целевой функции. Данный подход позволяет, в отличие от работ [1–3], при поиске оптимального расписания одновременно учитывать как ресурсные, так и логические ограничения, связанные с процессом выполнения требований.

Метод и алгоритмы решения задачи планирования функционирования транспортно-логистической сети

В основу общего метода решения сформулированной задачи неклассического вариационного исчисления положена идея комбинированного использования метода ветвей и границ и метода последовательных приближений (МПП) Крылова — Черноусько [7–10, 12]. Для этого наряду с основной задачей планирования (обозначим ее буквой Г) рассматривается релаксированная задача планирования (Р), в которой сняты ограничения, связанные с требованиями неразрывного выполнения операций.

Наряду с данным методом и соответствующим алгоритмом для аналогичной задачи также были предложены другие сочетания методов и алгоритмов – МПП и метод Ньютона; МПП и градиентные (субградиентные) методы; МПП и метод штрафных функций. Исследования показали, что выбор той или иной комбинации методов и алгоритмов существенно зависит от структуры пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определявших специфику решаемой задачи [13] (см. примеры на сайте http://litsam.ru). Главное отличие и новизна теоретических и практических результатов, полученных в рассматриваемой статье и связанных с исследованием проблем комплексного моделирования и планирования работы ТЛС в динамически изменяющихся условиях, состоит в том, что, благодаря предложенной авторами системно-управленческой интерпретации всего спектра возникающих при этом частных задач, удается с единых методологических и методических позиций подойти к их формальному единому описанию и решению, которое базируется на фундаментальных положениях современной системологии, неокибернетики и информатики. Это в конечном итоге гарантирует полноту, замкнутость и непротиворечивость выводов, формулируемых и проверяемых в ходе решения рассматриваемой задачи. Исследования выполнялись при финансовой поддержке гранта РНФ № 17-11-01254, а также в рамках финансирования госбюджетной темы 0073-2018-0003.

Библиографический список

1. Танаев В. С., Шкурба В. В. Введение в теорию расписаний. М.: Наука, 1975.

- 2. Taxa~X. А. Введение в исследование операций, 7-е изд.: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильяме», 2005. 912 с.
- 3. Зимин И. Н., Иванилов Ю. П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // Вычислительная математика и математическая физика. 1971. Т. 11. № 3. С. 632–641.
- 4. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1990. 272 с.
- 5. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.
- 6. $Can\partial un\ Jaxupu$. RFID. Руководство по внедрению. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2007. 312 с.
- 7. *Калинин В. Н., Соколов Б. В.* Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования

- комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1987. № 1. С. 106–114.
- 8. *Ivanov D.*, *Sokolov B*. Adaptive Supply Chain Management. London: Springer, 2016.
- 9. *Ivanov D.*, *Sokolov B.*, *Kaeschel J.* A multistructural framework for adaptive supply chain planning and operations with structure dynamics considerations // European Journal of Operational Research. 2010. 200(2). C. 409–420.
- 10. *Ivanov D.*, *Sokolov B.* Dynamic supply chain scheduling. Journal of Scheduling. 2010. DOI: 10.1007/s10951-010-0189-6.
- 11. Ли Э. Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972.
- 12. *Крылов И. А.*, *Черноусько Ф. Л.* Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления // ЖВМ и МФ. 1972. № 1. С. 14–34.

УДК 681.53

В. Ф. Шишлаков*

доктор технических наук, профессор

И. Г. Криволапчук*

старший преподаватель

Е. Ю. Ватаева*

ассистент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПОЛУНАТУРНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС СИСТЕМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В статье рассматривается построение модели системы экстремального регулирования (СЭР) с использованием платформы NI ELVIS-II и программного обеспечения LabVIEW, приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: системы экстремального регулирования, корреляционные экстремальные системы, моделирование, платформа NI ELVIS-II.

V. F. Shishlakov*

Dr. Sc., Tech., Professor

I. G. Krivolapchuk*

Senior Lecturer

E. Yu. Vataeva*

Assistant

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SEMINATURAL RESEARCH COMPLEX OF EXTREMUM SEEKING CONTROL SYSTEM

The article deals with the construction of the model of the extremum seeking control system (ESCS) using the NI ELVIS-II platform and LabVIEW software and the results of modeling are presented.

Keywords: extreme regulation systems, correlation extremal systems, modeling, NI ELVIS-II platform.

Большие возможности моделирования сложных систем дает сочетание математического моделирования с физическим, так называемое полунатурное моделирование. Данный метод подразумевает исследование систем управления на моделирующих комплексах, включающих в свой состав элементы реальной аппаратуры. Применение полунатурного моделирования возможно как на этапе проектирования, так и на этапе проверки работоспособности отдельных узлов и законченного изделия. При этом может быть использован метод вытеснения, когда использование реальной аппаратной части расширяется по мере реализации новых узлов. Интересной особенностью метода является возможность относительно произвольного сочетания реальных и моделируемых частей системы.

Полунатурное моделирование находит широкое применение при разработке систем управления летательными аппаратами и создании тренажерных комплексов. Наряду с реальной аппаратурой в замкнутую модель входят имитаторы воздействий и помех, математические модели внешней среды и процессов.

Одной из задач разработки систем управления беспилотными летательными аппаратами является создание устройств, имеющих возможность работы в том числе в пассивном режиме. В их основе часто лежат корреляционные экстремальные системы (КЭС), то есть системы экстремального регулирования, задачей которых является поддержание экстремального значения выходного сигнала коррелятора — взаимной корреляционной функции неких сигналов, подаваемых на его вход.

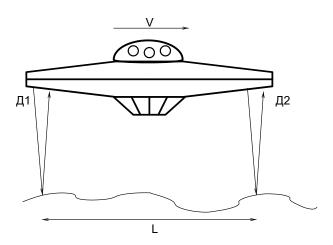


Рис. 1. Пример использования КЭС для измерения или поддержания путевой скорости

Примеры возможного использования КЭС приведены на рис. 1, 2. В первом случае коррелятор используется для измерения или поддержания путевой скорости. Входные сигналы коррелятор получает от датчиков $\mathcal{J}1$ и $\mathcal{J}2$, разнесенных на расстояние L. Сигналы подобны по форме, но сдвинуты во времени на величину транспортного запаздывания

$$f_{\mathcal{I}\!\!/2}(t) \approx f_{\mathcal{I}\!\!/1}(t-T_I); \ T_I = \frac{L}{V}.$$

Выходной сигнал коррелятора является оценкой взаимной корреляционной функции сигналов f_{Z1} и f_{Z2} :

$$\frac{1}{T} \int_{0}^{T} f_{\mathcal{I}1}(t-T) f_{\mathcal{I}2}(t) dt.$$

Очевидно, что значение интеграла будет максимально при $\tau = \tau_T$. Задача регулятора состоит в поддержании величины τ , близкой к τ_T .

Вторая система (рис. 2) предназначена для позиционирования ΠA на заданной высоте H, при которой сигналы датчиков имеют максимальное сходство.

Моделирование СЭР представляет собой достаточно сложную задачу, особенно при пара-

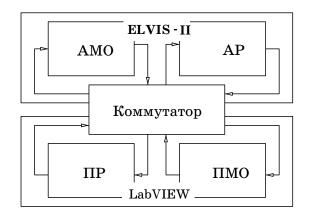


Рис. 3. Структура стенда, реализующего СЭР

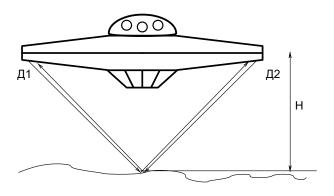


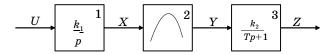
Рис. 2. Пример использования КЭС для позиционирования ЛА на заданной высоте

метрической нестационарности экстремальной характеристики [1, 2, 3]. К системам автоматического управления такого класса, в частности, относятся системы управления торможением колес (САУ ТК) транспортного средства (автомобили и тяжелые самолеты). В значительной мере к такому же классу относятся системы, рассмотренные выше. Для упрощения задачи и облегчения понимания процессов, происходящих в системе, целесообразно применение полунатурного подхода к моделированию.

Структура стенда, реализующего СЭР, приведена на рис. З и включает в себя два функционально идентичных канала — программный и аппаратный, объединенные посредством коммутатора. На рисунке приняты следующие обозначения: АМО — аппаратная модель объекта; АР — аппаратный регулятор; ПМО и ПР — соответственно программные реализации объекта и регулятора.

Структурная схема объекта управления показана на рис. 4. Объект включает в себя исполнительный механизм (1), блок формирования изменяемой экстремальной характеристики (2) и линейную часть (3). Коммутатор позволяет получить все возможные сочетания программных и аппаратных узлов, а также объединить обе части стенда для построения двумерной экстремальной системы [4].

Представленная структурная схема реализации модели СЭР является универсальной и обладает широкими возможностями по решению задач моделирования. Аналоговая часть модели без упрощений и допущений воспроизводит нестационарную экстремальную характеристику, аппаратный регулятор имеет фиксирован-



Puc. 4. Структурная схема объекта управления

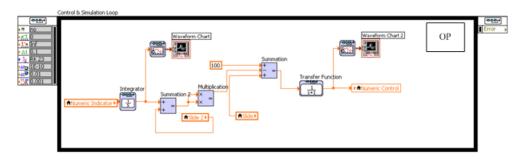


Рис. 5. Модель объекта регулирования

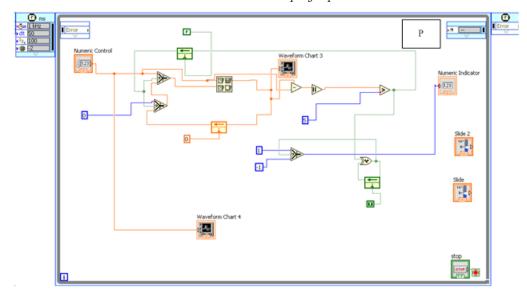


Рис. 6. Фрагменты программного регулятора. Модель программного регулятора

ную структуру и ограниченные возможности настройки параметров, а программный регулятор позволяет моделировать законы управления САУ ТК любой степени сложности.

На рис. 5 и 6 приведена функциональная схема программного регулятора, который включает в себя модели объекта регулирования и регулятора. В качестве объекта регулирования выбра-

на система экстремального регулирования с запаздыванием.

На рис. 7 приведены фазовый портрет и процесс, проходящий в аппаратной модели объекта [6].

Интерфейс программной части модели показан на рис. 8, где обозначено следующее.

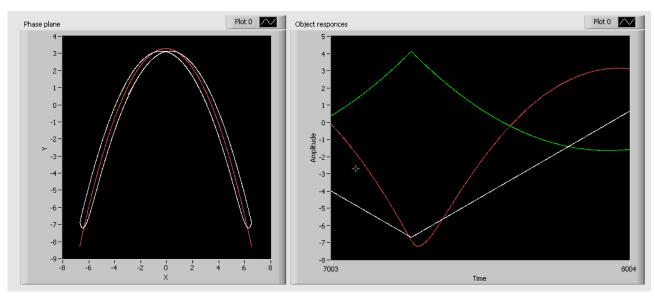


Рис. 7. Фазовый портрет и процесс в аппаратной модели объекта

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

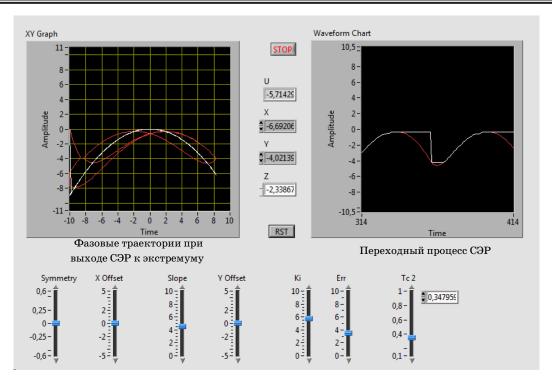
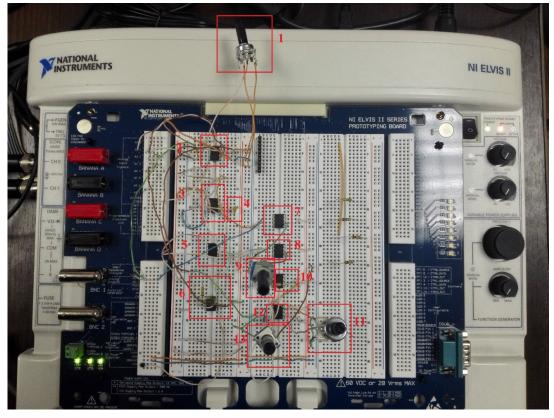


Рис. 8. Интерфейс управляющей программы макета

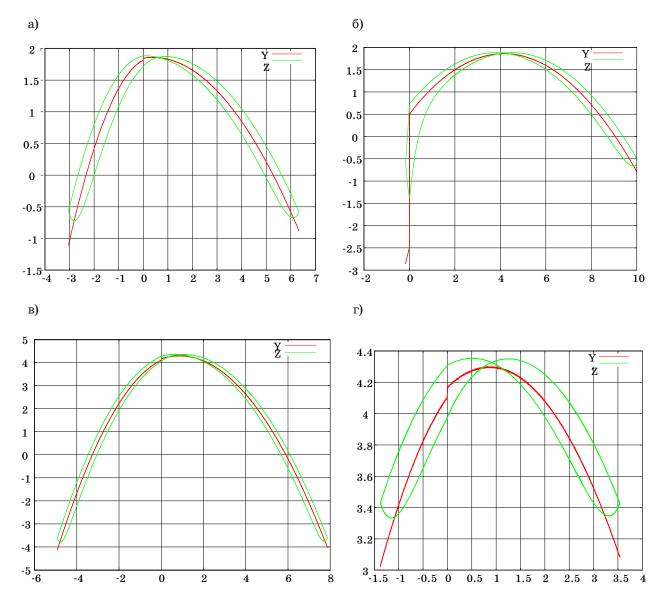
Symmetry — симметрия экстремальной характеристики; X Offset — смещение характеристики по координате x; Y Offset — смещение характеристики по координате y; Slope — крутизна характеристики; k_i — коэффициент усиления; Err — ошибка; T_c2 — постоянная времени апериодического звена. Используя движки X Offset и Y

Offset, можно изменять параметры параболы по координатам x и y, то есть вводить нестационарность экстремальной характеристики.

Аналоговая часть системы реализована на отладочной плате NI ELVIS-II и представлена на рис. 9, где приняты следующие обозначения: 1 — движок, позволяющий перемещать парабо-



Puc. 9. Макет системы на отладочной плате NI ELVIS-II



лу по оси x; 2 – умножитель; 3 – устройство выборки/хранения (записывает/извлекает значения в блок 5); 4 – конденсатор запоминающего устройства системы; 5 – компаратор; 6 – линейная часть объекта (апериодическое звено); 7, 8 – операционные усилители (ОУ); 9 – движок, изменяющий направление восьмерки; 10 – ОУ, на который поступает коэффициент наклона ветвей параболы; 11 – движок, позволяющий перемещать параболу по оси y; 12 – перемножитель, реализующий изменение наклонов ветвей; 13 – движок, регулирующий наклон ветви.

На рис. 10, *a-г* приведены осциллограммы работы аналоговой модели при различных параметрах объекта и разных настройках регулятора.

Полученные результаты показывают, что задачи моделирования динамики сложных, суще-

ственно нелинейных систем автоматического управления с экстремальными характеристиками в условиях их параметрической нестационарности целесообразно решать путем сочетания аналогового и компьютерного моделирования. Аналоговое моделирование позволяет в значимой степени упростить процесс исследования и модификации системы, устраняя недостатки использования математических методов. При этом дает возможность формировать экстремальные характеристики, максимально приближенные к реальным, используя статическую и динамическую деформации, обеспечивает нестационарность экстремальной характеристики и позволяет работать в режиме реального времени. Компьютерное моделирование дает возможность исследовать различные законы управления.

Библиографический список

- 1. Шишлаков В. Ф., Криволапчук И. Г., Ватаева Е. Ю. Моделирование динамики работы систем экстремального регулирования (СЭР) // Мехатроника, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. № 1. С. 130–132.
- 2. NI ELVIS II Series Quick Start Guide, December 2015.
- 3. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: моногр. / под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2003. 358 с.
- 4. Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С. Синтез САУ при различных видах ап-

- проксимации нелинейных характеристик: теория и практика: моногр. / под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2017.
- 5. Шишлаков В. Ф., Цветков С. А., Шишлаков Д. В. Синтез параметров непрерывных и импульсных многосвязных систем автоматического управления: моногр. / под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2009.
- 6. Ватаева Е. Ю., Криволапчук И. Г., Шишлаков В. Ф. Гибридное моделирование СЭР на платформе ELVIS-II // Автоматизированное проектирование в машиностроении: матер. V междунар. заочной науч.-практ. конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. № 5. С. 90–96.

УДК 681.51

В. Ф. Шишлаков*

доктор технических наук, профессор

Д. В. Шишлаков*

кандидат технических наук, доцент

Е. Ю. Ватаева*

ассистент

Н. В. Решетникова*

ассистент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ САУ ПРИ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

В статье рассматривается решение задачи синтеза законов управления электромеханических систем автоматического управления. В качестве математического аппарата решения применяется обобщенный метод Галеркина. Рассмотренный метод распространен на новый класс систем с нелинейными характеристиками, аппроксимированными полиномиально.

Ключевые слова: полиномиальная аппроксимация, нелинейные характеристики, обобщенный метод Галеркина.

V. F. Shishlakov*

Dr. Sc., Tech., Professor

D. V. Shishlakov*

PhD, Tech., Associate Professor

E. Yu. Vataeva*

Assistant

N. V. Reshetnikova*

Assistant

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SYNTHESIS OF THE PARAMETERS OF CONTROL LAWS OF NONLINEAR AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR POLYNOMIAL APPROXIMATION

The paper presents the solution of the problem of synthesis of the laws of control of electromechanical automatic control system under polynomial approximation. As a mathematical apparatus of the decision the generalized Galerkin's method is applied. This method is extended to a new class of objects with nonlinear characteristics approximated polynomially.

Keywords: polynomial approximation, nonlinear characteristics, generalized Galerkin method.

Обеспечение заданных показателей качества работы нелинейных систем автоматического управления (САУ) в переходных режимах представляет собой весьма сложную задачу, правильное решение которой во многом связано с построением адекватной математической модели.

Поскольку в состав электромеханических систем и комплексов входят элементы и устрой-

ства, имеющие нелинейные характеристики, то при разработке математических моделей степень их адекватности непосредственно связана с принятым способом аппроксимации нелинейностей.

Наиболее распространенным методом аппроксимации нелинейных характеристик является кусочно-линейная аппроксимация. Однако полученные таким образом модели не всегда могут с достаточной степенью точности воспроизводить нелинейные характеристики, особенно если речь идет об экстремальных характеристиках: таких как механическая характеристика асинхронного двигателя или зависимость коэффициента сцепления от величины относительного проскальзывания. Подобные зависимости с помощью кусочно-линейной аппроксимации можно воспроизвести достаточно точно при весьма большом числе кусочно-линейных участков. Уменьшение числа кусочно-линейных участков для аппроксимации позволяет достаточно быстро получить результат, однако погрешность расчета может оказаться недопустимо высокой. Вместе с тем усложнение аппроксимирующих выражений для нелинейных характеристик может создать значительные затруднения при исследовании, поскольку динамические свойства нелинейных систем управления сами по себе достаточно сложны.

Поэтому представляется целесообразным использовать в таких случаях полиномиальную (алгебраическую) аппроксимацию, которая в отличие от теории автоматического управления очень широко применялась и применяется в электротехнике [1–3]. При этом аппроксимирующий полином записывается в виде

 $y(x) = y(x_0) + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2 + K + a_n(x - x_0)^n$, где коэффициенты a_1, a_2, \ldots, a_n определяются выражениями

$$a_{1} = \left(\frac{dv}{dx}\right)_{x=x_{0}}; a_{2} = \frac{1}{2!} \left(\frac{d^{2}v}{dx^{2}}\right)_{x=x_{0}};$$

$$a_{n} = \frac{1}{n!} \left(\frac{d^{n}v}{dx^{n}}\right)_{x=x_{0}}; K.$$

Аппроксимация степенным полиномом заключается в нахождении коэффициентов ряда $a_1, a_2, ..., a_n$. При заданной форме характеристики эти коэффициенты существенно зависят от выбора рабочей точки, а также от ширины используемого участка характеристики.

Эффективным методом решения задачи синтеза параметров закона управления электромеханических и робототехнических систем и комплексов является обобщенный метод Галеркина [4–7], позволяющий с единых математических, методологических и алгоритмических позиций решать подобные задачи для САУ широкого класса, динамические свойства которых описываются нелинейными дифференциальными уравнениями произвольно высокого порядка.

Общая схема решения задачи подробно рассмотрена в ставших фундаментальными монографиях [4, 5], поэтому ниже остановимся лишь на вопросах, связанных с распространением метода на новый класс аппроксимирующих нелинейные характеристики соотношений.

С математической точки зрения задача синтеза параметров законов управления сводится к поиску минимума целевой функции, построенной на основе уравнений Галеркина

$$J= \ = \sum_{q=1}^m \left\{ \int\limits_0^\infty \left[\sum_{i=0}^n a_i \left(c_k \right) A_{qi} + \sum_{i=0}^u b_i \left(c_k \right) B_{qi} - \sum_{i=0}^v e_i \left(c_k \right) C_{qi} \right] \right\}^2, \ \min_{c_k} J o 0,$$

где $a_i,\ b_i,\ e_i$ — вещественные постоянные коэффициенты полиномов оператора обобщенного дифференцирования D степеней $n,\ u,\ v,$ соответственно, являющиеся в общем случае функциями варьируемых параметров c_k закона управления системы; $A_{qi},\ B_{qi},\ C_{qi}$ — интегралы Галеркина вила

$$egin{aligned} A_{qi} &= \int\limits_0^\infty D^i \left\{ x^0\left(t
ight)
ight\} e^{-
ho_q t} dt, i = 0,1,...,n; \ B_{qi} &= \int\limits_0^\infty D^i \left\{ F \left[x^0\left(t
ight)
ight]
ight\} e^{-
ho_q t} dt, i = 0,1,...,u; \ C_{qi} &= \int\limits_0^\infty D^i \left\{ f(t)
ight\} e^{-
ho_q t} dt, i = 0,1,...,v, \end{aligned}$$

здесь $x^0(t)$ — желаемое программное движение на входе нелинейного элемента; $F[x^0(t)]$ — аппроксимированная полиномом нелинейная характеристика; f(t) — внешнее входное воздействие.

Поиск оптимума целевой функции определяется при технических ограничениях, наложенных на значения варьируемых параметров из условий технической реализуемости, ограничениях на абсолютную устойчивость САУ и грубость на заданные вариации искомых параметров закона управления.

Поскольку интегральные соотношения A_{qi} , C_{qi} были получены ранее для различных видов программных движений и внешних входных воздействий [5–7], то для развития обобщенного метода Галеркина на новый класс аппроксимирующих нелинейные характеристики функций требуется определить значения интегралов B_{qi} на семействе элементарных функций.

То есть для решения задачи синтеза САУ при полиномиальной аппроксимации характеристик требуется вычислить интеграл

$$\begin{split} B_{qi} &= \int\limits_{0}^{\infty} D^{i} \left\{ F \left[x^{0} \left(t \right) \right] \right\} e^{-\rho_{q} t} dt = \\ &= \int\limits_{0}^{\infty} D^{i} \left\{ \sum_{g=0}^{l} z_{g} \left(x^{0} \left(t \right) \right)^{g} \mathbf{1} \left(t \right) \right\} e^{-\rho_{q} t} dt, \end{split}$$

где

$$F\left[x^{0}(t)\right] = \sum_{g=1}^{l} F_{g}\left[x^{0}(t)\right] =$$

$$= \sum_{g=0}^{l} z_{g}\left(x^{0}(t)\right)^{g}, g = 0, 1, \dots, l,$$

что представляет собой распространение принципа эквивалентных преобразований [5, 6] на нелинейные характеристики при их аналитической аппроксимации и существенно упрощает вычисление интегралов.

Опыт решения практических задач синтеза линейных и нелинейных математических моделей систем управления обобщенным методом Галеркина показывает, что в качестве программного движения достаточно принимать решение линейного дифференциального уравнения не выше второго порядка [5, 7], что, как правило, меньше порядка дифференциального уравнения, описывающего движение синтезируемой системы. Это положение представляется вполне обоснованным, поскольку решается задача синтеза, а не идентификации. Поэтому подчеркивать в программном движении высшие гармонические составляющие, влияние которых стремятся уменьшить, не имеет практического смысла.

Кроме того, при проектировании САУ регламентированными показателями обычно являются показатели качества переходного процесса. Поэтому должно быть взаимно однозначное соответствие между этими показателями и параметрами желаемого программного движения (коэффициентами затухания и собственными частотами колебаний его составляющих), которое определено для линейных дифференциальных уравнений первого и второго порядков.

В результате вычислений получаем

$$B_{qi} = \int_{0}^{\infty} D^{i} \left\{ F \left[x^{0}(t) \right] \right\} e^{-\rho_{q}t} dt =$$

$$= B_{q} \rho_{q}^{i-1}, i = 0, 1, ..., u,$$

где соотношения, определяющие B_q , вычислены для процесса

$$x^{0}(t) = [H^{*}e^{-\alpha t}\cos(\beta t - \varphi_{0})]1(t),$$

соответствующего записи уравнения движения системы относительно входа и процесса

$$x^{0}(t) = (x_{y} - H^{*}e^{-\alpha t}\cos(\beta t - \varphi_{0}))1(t),$$

соответствующего записи уравнения движения системы относительно сигнала ошибки. Поскольку мгновенно получить общую формулу

Таблица 1

Интегралы Галеркина B_q для процесса вида $x^0(t) = [H^*e^{-\alpha t}\cos(\beta t - \phi_0)]\mathbf{1}(t)$

g=2	$H^{2*}\rho_{q}\left\{\left[\frac{1}{2(2\alpha+\rho_{q})}+\frac{\left(\left(2\alpha+\rho_{q}\right)\cos 2\varphi_{0}+2\beta\sin 2\varphi_{0}\right)}{2\left((2\alpha+\rho_{q})^{2}+4\beta^{2}\right)}\right]+2\sum_{j=1}^{r-1}(-1)^{j}\left[\frac{1}{2(2\alpha+\rho_{q})}+\frac{\left(\left(2\alpha+\rho_{q}\right)\cos 2\varphi_{0}+2\beta\sin 2\varphi_{0}\right)}{2\left((2\alpha+\rho_{q})^{2}+4\beta^{2}\right)}\right]+\frac{\left((2\alpha+\rho_{q})\cos 2\varphi_{0}+2\beta\sin 2\varphi_{0}\right)}{2\left((2\alpha+\rho_{q})^{2}+4\beta^{2}\right)}\right]+\frac{\left((2\alpha+\rho_{q})\cos 2\varphi_{0}+2\beta\sin 2\varphi_{0}\right)}{2\left((2\alpha+\rho_{q})^{2}+4\beta^{2}\right)}$
	$+{\left(-1\right)^r}\left[\frac{1}{2{\left(2\alpha + {\rho _q}\right)}} + \frac{{\left({\left(2\alpha + {\rho _q}\right)}{\cos 2{\phi _0} + 2\beta \sin 2{\phi _0}}\right)}}{2{\left({\left(2\alpha + {\rho _q}\right)^2 + 4\beta ^2}\right)}}\right]\right\}{{\rho _q}^{-1}}$
g=3	$\left\{\frac{H^{3*}}{4}\rho_q\left[\frac{3\big(3\alpha+\rho_q\big){\cos\phi_0+\beta\sin\phi_0}}{(3\alpha+\rho_q)^2+\beta^2}+\frac{\big(3\alpha+\rho_q\big){\cos3\phi_0+3\beta\sin3\phi_0}}{(3\alpha+\rho_q)^2+9\beta^2}\right]\right\}{\rho_q}^{-1}$
g=4	$\frac{H^{4*}}{8}\rho_{q}\left\{\left[\frac{4\left(4\alpha+\rho_{q}\right)\!\cos 2\varphi_{0}+2\beta\!\sin 2\varphi_{0}}{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)^{2}+4\beta^{2}}+\frac{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)\!\cos 4\varphi_{0}+4\beta\!\sin 4\varphi_{0}}{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)^{2}+16\beta^{2}}+\frac{3}{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)}\right]+\frac{1}{2}\left(\frac{4\alpha+\rho_{q}}{2}\right)^{2}+\frac{1}{2}\left(4\alpha+\rho_$
	$+2\sum_{j=1}^{r-1}(-1)^{j}\left[\frac{4\left(4\alpha+\rho_{q}\right)\cos2\varphi_{0}+2\beta\sin2\varphi_{0}}{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)^{2}+4\beta^{2}}+\frac{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)\cos4\varphi_{0}+4\beta\sin4\varphi_{0}}{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)^{2}+16\beta^{2}}+\frac{3}{\left(4\alpha+\rho_{q}\right)}\right]+$
	$+(-1)^r \left\lfloor \frac{4 \left(4 \alpha + \rho_q\right) \cos 2 \varphi_0 + 2 \beta \sin 2 \varphi_0}{\left(4 \alpha + \rho_q\right)^2 + 4 \beta^2} + \frac{\left(4 \alpha + \rho_q\right) \cos 4 \varphi_0 + 4 \beta \sin 4 \varphi_0}{\left(4 \alpha + \rho_q\right)^2 + 16 \beta^2} + \frac{3}{\left(4 \alpha + \rho_q\right)} \right\rfloor \right\} \rho_q^{-1}$
g=5	$\boxed{\frac{H^{5^{*}}}{16}\rho_{q} \left\{ \left[\frac{\left(5\alpha+\rho_{q}\right)\cos5\phi_{0}+5\beta\sin5\phi_{0}}{\left(5\alpha+\rho_{q}\right)^{2}+25\beta^{2}} + \frac{5\left(5\alpha+\rho_{q}\right)\cos3\phi_{0}+3\beta\sin3\phi_{0}}{\left(5\alpha+\rho_{q}\right)^{2}+9\beta^{2}} + \frac{10\left(5\alpha+\rho_{q}\right)\cos\phi_{0}+\beta\sin\phi_{0}}{\left(5\alpha+\rho_{q}\right)^{2}+\beta^{2}} \right] \right\}\rho_{q}^{-1}}$

соотношений, определяющих B_q , для процессов [1] и [2] довольно сложно, то необходимо было вычислить соотношения для различных g. Результаты вычислений приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Обобщая выражения, приведенные в табл. 1, получаем

– для нечетной степени

$$B_{q} = \sum_{g=0}^{l} a_{g} \sum_{k=0}^{g} H^{*k} C_{g}^{k} \begin{cases} \frac{k}{2^{k-1} \left(k\alpha + \rho_{q}\right)} \left[1 - \left(k - 2E\left(\frac{k}{2}\right)\right)\right] + \frac{\left(k\alpha + \rho_{q}\right)\cos\left(k\varphi_{0}\right) + k\beta\sin\left(k\varphi_{0}\right)}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(k\beta\right)^{2}\right]} + \frac{\left(k\left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)\cos\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right) + \left(k - 2\right)\beta\sin\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right)\right]\right)}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(\left(k - 2\right)\beta\right)^{2}\right]} \end{cases};$$

- для четной степени

$$B_{q} = \sum_{g=0}^{l} a_{g} \sum_{k=0}^{g} H^{*k} C_{g}^{k} \begin{cases} \frac{k}{2^{k-1} \left(k\alpha + \rho_{q}\right)} \left[1 - \left(k - 2E\left(\frac{k}{2}\right)\right)\right] + \frac{\left(k\alpha + \rho_{q}\right)\cos\left(k\phi_{0}\right) + k\beta\sin\left(k\phi_{0}\right)}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(k\beta\right)^{2}\right]} \\ + \frac{k \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)\cos\left(\left(k - 2\right)\phi_{0}\right) + \left(k - 2\right)\beta\sin\left(\left(k - 2\right)\phi_{0}\right)\right]}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(\left(k - 2\right)\beta\right)^{2}\right]} \end{cases} + \frac{k \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)\cos\left(\left(k - 2\right)\phi_{0}\right) + \left(k - 2\right)\beta\sin\left(\left(k - 2\right)\phi_{0}\right)\right]}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(\left(k - 2\right)\beta\right)^{2}\right]} \end{cases}$$

Таблица 2

Интегралы Галеркина
$$B_q$$
 для процесса вида $x^0\left(t\right) = \left(x_y - H^*e^{-\alpha t}\cos(\beta t - \phi_0)\right)\mathbf{1}(t)$

$$+2\sum_{g=0}^{l}(-1)^{j} \left\{ \sum_{g=0}^{l} a_{g} \sum_{k=0}^{g} H^{*k} C_{g}^{k} \left\{ \frac{\frac{k}{2^{k-1} \left(k\alpha + \rho_{q}\right)} \left[1 - \left(k - 2E\left(\frac{k}{2}\right)\right)\right] + \frac{\left(k\alpha + \rho_{q}\right) \cos\left(k\varphi_{0}\right) + k\beta \sin\left(k\varphi_{0}\right)}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(k\beta\right)^{2}\right]} \right\} + \frac{k \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right) \cos\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right) + \left(k - 2\right)\beta \sin\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right)\right]}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(\left(k - 2\right)\beta\right)^{2}\right]} \right\} + \left\{ -1)^{j} \left\{ \sum_{g=0}^{l} a_{g} \sum_{k=0}^{g} H^{*k} C_{g}^{k} \left\{ \frac{k}{2^{k-1} \left(k\alpha + \rho_{q}\right)} \left[1 - \left(k - 2E\left(\frac{k}{2}\right)\right)\right] + \frac{\left(k\alpha + \rho_{q}\right) \cos\left(k\varphi_{0}\right) + k\beta \sin\left(k\varphi_{0}\right)}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(k\beta\right)^{2}\right]} \right\} + \frac{k \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right) \cos\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right) + \left(k - 2\right)\beta \sin\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right)\right]}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(\left(k - 2\right)\beta\right)^{2}\right]} \right\},$$

здесь E — целая часть числа.

Обобщая выражения, приведенные в табл. 2, получаем

$$B_{q} = \sum_{g=0}^{l} a_{g} \sum_{k=0}^{g} x_{y}^{g-k} H^{*k} (-1)^{k} C_{g}^{k} \begin{cases} \frac{k}{2^{k-1} \left(k\alpha + \rho_{q}\right)} \left[1 - \left(k - 2E\left(\frac{k}{2}\right)\right)\right] + \frac{\left(k\alpha + \rho_{q}\right) \cos\left(k\varphi_{0}\right) + k\beta \sin\left(k\varphi_{0}\right)}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(k\beta\right)^{2}\right]} \\ + \frac{k\left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right) \cos\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right) + \left(k - 2\right)\beta \sin\left(\left(k - 2\right)\varphi_{0}\right)\right]}{2^{k-1} \left[\left(k\alpha + \rho_{q}\right)^{2} + \left(\left(k - 2\right)\beta\right)^{2}\right]} \end{cases}$$

Таким образом, рекуррентные соотношения, определяющие интегралы Галеркина B_{qi} для полиномиальных нелинейных характеристик, дают возможность применять метод для решения задачи синтеза законов управления электромеханических и робототехнических систем и комплексов при данном виде аппроксимации характеристик нелинейных элементов.

Библиографический список

- 1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи: учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1978. 528 с.
- 2. Жуховицкий Б. Я., Негневицкий И. Б. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. В 3 т. / под общ. ред. К. М. Поливанова. Т. 2. Линейные электрические цепи (продолжение). Нелинейные цепи. М.: Энергия. 1972. 200 с.
- 3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей: учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
- 4. *Шишлаков В. Ф.* Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: моногр. СПб.: ГУАП, 1999.
- 5. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: моногр. / под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2003.

- 6. Шишлаков В. Ф., Цветков С. А., Шишлаков Д. В. Синтез параметров непрерывных и импульсных многосвязных систем автоматического управления: моногр. / под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2009.
- 7. Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С. Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: моногр. / под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2017.
- 8. Шишлаков В. Ф., Криволапчук И. Г., Ватаева Е. Ю. Моделирование динамики работы систем экстремального регулирования (СЭР) // Мехатроника, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. № 1. С. 130–132.
- 9. Ватаева Е. Ю., Криволапчук И. Г., Шишлаков В. Ф. Гибридное моделирование СЭР на платформе ELVIS II // Автоматизированное проектирование в машиностроении: матер. V междунар. заочной науч.-практ. конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. № 5. С. 90—96.

УДК 681.532.55

Д. О. Якимовский*

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела

Д. С. Положенцев*

аспирант, инженер 1-й категории

*АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИЛОВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ОТРАБОТКЕ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

Рассмотрены вопросы создания исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса, характеризующегося высокими требованиями к точности отработки малых скоростей вращения. Представлена структурная схема электропривода, обладающего повышенной чувствительностью к отработке малых скоростей вращения. Приведены результаты макетирования исполнительного электропривода.

Ключевые слова: система управления угловой скоростью, обратная связь по углу, исполнительный электропривод.

D. O. Yakimovsky*

PhD, Tech., Head of Research Department

D. S. Polozhentcev*

PhD Student, Engineer of the 1st Category *Joint-Stock Society "Command Devices Reseach Institute", St. Peterburg

INCREASING SENSITIVITY OF CONTROL MOMENT GYROSCOPE ELECTRIC DRIVE WHEN OPERATING AT LOW ROTATIONAL VELOCITIES

The article deals with the issues of designing a control moment gyroscope electric drive characterized by strict requirements to the accuracy of operation at low rotational velocities. The article shows a block diagram for the electric drive with increased sensitivity to operation at low rotational velocities. The results of the electric drive experimental are also presented.

Keywords: angular velocity control system, angle feedback, electric drive.

Силовые гироскопические комплексы (СГК) используются в составе систем управления ориентацией космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Создание современных КА ДЗЗ требует все более высоких точностных и динамических характеристик СГК.

Управляющий момент СГК определяется как векторное произведение кинетического момента ротора гиромотора на угловую скорость поворота его подвеса. Стабильность модуля кинетического момента ротора обеспечивается с точностью до десятых долей процента, поэтому точность реализации управляющего момента СГК определяется работой исполнительного электропривода (ИЭП) подвеса гиромотора (ПГ) силового гироскопического прибора (СГП).

Режим стабилизации и режим программных поворотов являются основными режимами рабо-

ты СГК. Режим стабилизации СГК КА характеризуется низкими задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ, которые могут быть на уровне сотых и даже тысячных долей градуса в секунду и высокими требованиями к точности их отработки. Режим программных поворотов СГК КА характеризуется задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ на уровне десятков градусов в секунду и высоким значением возмущающего гироскопического момента, действующего по оси ПГ.

Современный бортовой ИЭП строится на основе вентильного двигателя и работает в режиме обратной связи по угловому положению ПГ. На валу ПГ располагается датчик угла, сообщающий информацию о направлении вектора кинетического момента СГК в систему управления ориентацией КА. Обычно этот датчик угла ис-

пользуется для организации обратной связи по угловому положению и для управления вентильным двигателем. Жесткие требования по ограничению габаритно-массовых характеристик бортовых приводов, стойкости к факторам космического пространства, наличию резервирования и длительный срок активного существования КА существенно влияют на структуру, состав и элементы конструкции ИЭП. В частности, разрешающая способность датчика угла ограничена указанными требованиями и обычно не превышает 16–18 разрядов.

В режиме стабилизации требования к точности отработки заданной скорости вращения ИЭП СГК оцениваются следующим условием: при задании в моменты времени t_i с интервалом $\tau_{\partial} = t_{i+1} - t_i = 0,125$ с значений скорости в моменты времени $t_i + 2\tau_{\partial}$ должно выполняться неравенство

$$\left|\Delta\beta_f - \Delta\beta_p\right| \leq \delta\beta$$
,

где $\Delta \beta_f = \beta \left(t_i + 2 \cdot \tau_\partial\right) - \beta \left(t_i\right)$; $\beta \left(t_i + 2 \cdot \tau_\partial\right)$, $\beta \left(t_i\right) -$ угловые положения $\Pi \Gamma$;

$$\Delta\beta_{p} = \left[u(t_{i}) + u(t_{i} + \tau_{\partial})\right] \cdot \tau_{\partial};$$

где $u(t_i)$, $u(t_i+ au_\partial)$ — заданные скорости вращения подвеса.

При этом величина $\delta \beta$ должна быть менее 15'' для циклограмм штатных задаваемых угловых скоростей ИЭП СГК, представленных заказчиком. Пример такой циклограммы представлен на рис. 1.

Структурная схема ИЭП СГК с датчиком угла обратной связи, расположенным на оси ПГ, работающего в режиме следящей системы по линейно изменяющемуся углу, представлена на рис. 2, где И — интегратор скорости [1, 2]; РУ — регулятор контура углового положения [2]; ВШИМ — векторный широтно-импульсный модулятор; БВУ — блок вычисления углового положения ротора двигателя; КУМ — ключевой усилитель мощности; Д — двигатель; Р — редуктор; ПГ — подвес гироскопа; ДУ ПГ — датчик углового положения ПГ; ЭП ДУ — электронный преобразователь сигнала датчика угла; МК — микроконтроллер; БУП — блок управления приводом; ИЭП — исполнительный электропривод; N_{\odot} — управляющий

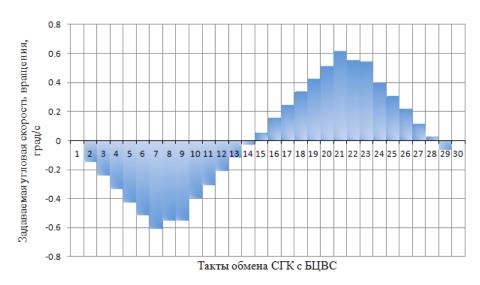
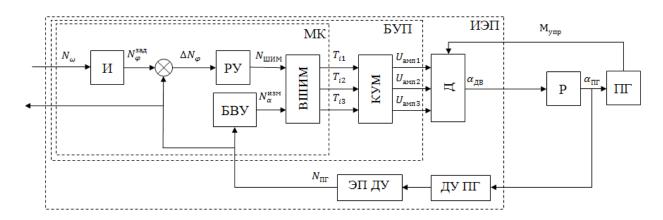


Рис. 1. Типичная циклограмма задаваемых угловых скоростей ИЭП СГК



 $Puc.\ 2.\ Cmpykmyphas\ cxema\ HЭП\ C\Gamma K\ c\ \partial amчиком\ oбратной\ cвязи,\ pacnoлoжeнным\ на\ ocu\ П\Gamma$

код скорости; $N_{\phi}^{sa\partial}$ — расчетный код углового положения $\Pi\Gamma$; ΔN_{ϕ} — сигнал рассогласования контура углового положения; N_{HIMM} — входное значение кода ВШИМ; T_a ; T_b ; T_c — длительности сигналов ВШИМ, управляющие КУМ; U_{amn1} ; U_{amn2} ; U_{amn3} — амплитудные значения линейных напряжений, подаваемых на двигатель; α_{JB} — значение углового положения вала двигателя; $\alpha_{\Pi\Gamma}$ — значение углового положения $\Pi\Gamma$; M_{ynp} — значение момента упругости, создаваемого $\Pi\Gamma$; $N_{\Pi\Gamma}$ — код измеренного углового положения $\Pi\Gamma$.

Проработка технических решений показала невозможность выполнения заданных требований к точности отработки заданной угловой скорости вращения при использовании рассмотренной схемы построения ИЭП в связи с тем, что требовалось увеличение числа разрядов датчика угла до 21–22.

Так как в состав ИЭП входит редуктор (коэффициент редукции 16), для выполнения заданных технических требований было предложено решение об установке датчика угла на ось двигателя ИЭП для организации контура управления по информации об угловом положении ротора двигателя ИЭП.

Это является принципиальным отличием от построения системы управления ИЭП СГК, рассмотренной выше. Использование обратной связи по угловому положению ротора двигателя повышает чувствительность ИЭП и, как следствие, улучшает его динамические характеристики в режиме малых скоростей, что необходимо для выполнения требования к точности отработки заданной угловой скорости поворота подвеса. Структурная схема ИЭП, представленная на рис. 2, может быть преобразована к виду, представленному на рис. 3, где ДУ Д — датчик углового положения ротора двигателя; $N_{\overline{A}}$ — код измеренного углового положения ротора двигателя.

Коэффициент интегрирования скорости вычисляется по следующей формуле:

$$K_{\omega} = \frac{K_{\mathrm{Kp}}}{\delta} \cdot i$$

где $K_{\rm kp}$ — крутизна характеристики «кодскорость», δ — дискретность преобразования «угол-код» датчика угла, i — передаточное число редуктора (в случае расположения датчика обратной связи на оси $\Pi\Gamma$ i=1).

Крутизна характеристики «код-скорость» определяется как

$$K_{\mathrm{Kp}} = \frac{\omega_{\mathrm{3ag.max}}}{2^n - 1},$$

где $\omega_{\rm 3ad,max}$ — максимальная задаваемая скорость, n — используемое число разрядов регистра, хранящего значение задаваемой скорости (без учета знакового разряда).

Для отработки системы управления ИЭП с датчиком обратной связи, расположенным на оси ПГ, и датчиком обратной связи, расположенным на оси двигателя, было проведено макетирование с использованием 17-разрядного датчика угла в контурах обратной связи. На рис. 4, a представлены диаграммы углового положения ПГ при отработке ИЭП минимальной угловой скорости вращения — 0,0042 °/с при расположении датчика обратной связи на оси ПГ, а на рис. 4, δ — на оси двигателя. Видно, что качество отработки угловой скорости вращения ПГ гораздо выше при расположении датчика обратной связи на оси двигателя.

На рис. 5, a представлены диаграммы погрешности $\left(\Delta\beta_f - \Delta\beta_p\right)$ отработки ИЭП задаваемой угловой скорости вращения по циклограмме, представленной на рис. 1, при расположении датчика обратной связи на оси ПГ, а на рис. 5, σ – на оси двигателя. Видно, что погрешность отработки задаваемой угловой скорости вращения

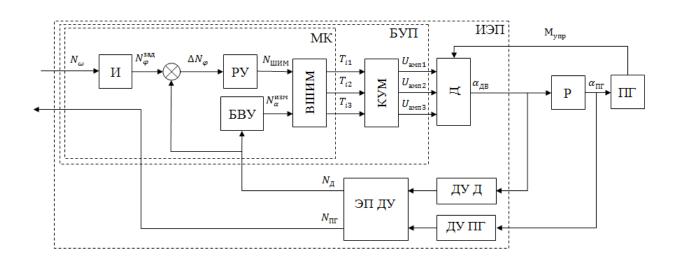


Рис. З. Структурная схема ИЭП СГК с датчиком обратной связи, расположенным на оси двигателя

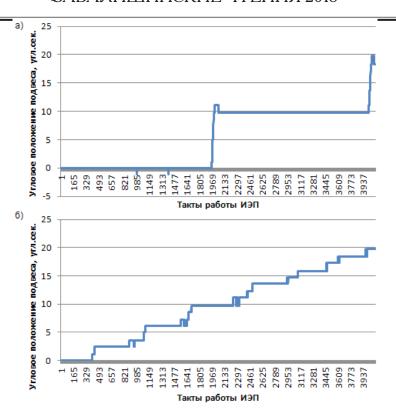


Рис. 4. Диаграммы углового положения ПГ при отработке ИЭП минимальной угловой скорости вращения: а – при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б – при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

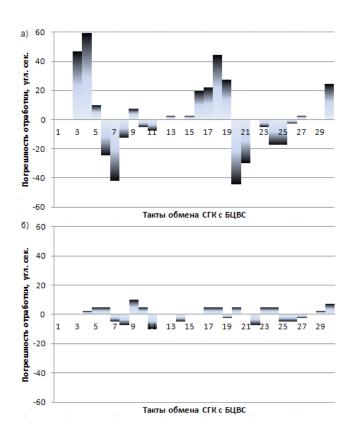


Рис. 5. Диаграммы погрешности отработки ИЭП задаваемой угловой скорости вращения:

а — при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б — при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

существенно снижается при расположении датчика обратной связи на оси двигателя.

Несмотря на преимущества установки датчика обратной связи на оси двигателя, использование подобной системы управления имеет существенный недостаток: часть элементов конструкции ИЭП (редукторная передача и ПГ) не охвачена контуром управления. Вследствие этого в создаваемую угловую скорость вращения ПГ будет вноситься погрешность, обуславливаемая нежесткостью конструкции СГП, люфтом редукторной передачи и несоосностью осей двигателя и ПГ.

На рис. 6 представлены результаты отработки ИЭП угловой скорости вращения ПГ при расположении датчиков обратной связи на оси ПГ и на оси двигателя. По оси абсцисс отмечены такты съема информации, один такт соответствует времени 1,6 мс. Видно, что при расположении датчика обратной связи на оси двигателя наблюдаются колебания угловой скорости вращения ПС, которые отсутствуют при расположении датчика обратной связи на оси ПГ. Такие колебания могут отрицательно сказываться на работе системы ориентации КА.

На основании вышеизложенного видится построение ИЭП с использованием двух датчиков угла обратной связи. Причем датчик угла, установленный на оси двигателя, должен будет замыкать обратную связь только в режиме малых скоростей, когда влияние нежесткости кон-

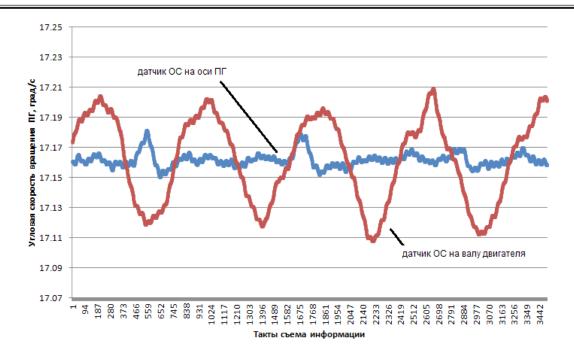


Рис. 6. Пульсации угловой скорости вращения ПГ

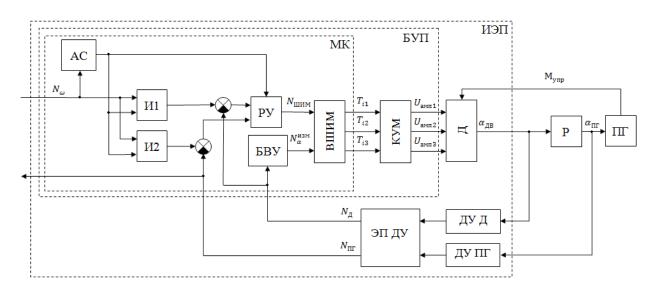


Рис. 7. Структурная схема ИЭП СГК с двумя датчиками обратной связи

струкции, люфта редуктора и несоосности осей минимально или отсутствует. В режиме средних и высоких скоростей в качестве датчика обратной связи должен использоваться датчик угла, расположенный на оси ПГ. При этом структурная схема ИЭП, представленная на рис. 3, примет вид, представленный на рис. 7, где И1 и И2 — интеграторы скорости; АС — анализатор скорости

Анализатор скорости настроен на определение перехода границы между низкой и высокой скоростью. При этом меняются коэффициенты регулятора и задаются новые значения интегратора скорости того контура, на котором в дальнейшем будет работать система. Новое значение

интегратора рассчитывается таким образом, чтобы сохранить текущее значение сигнала рассогласования по отношению к оси ПГ. Например, при переходе высокой скорости на низкую новое значение интегратора И1 рассчитывается по формуле

$$N_{i1} = N_{\mathcal{I}} + N_{CP} \quad \Pi \Gamma \cdot i,$$

где N_{i1} — значение, записываемое в интегратор скорости контура углового положения двигателя, $N_{\mathcal{I}}$ — текущее угловое положение ротора двигателя, $N_{CP_\Pi\Gamma}$ — значение сигнала рассогласования в контуре углового положения $\Pi\Gamma$.

При переходе с низкой скорости на высокую:

$$N_{i2} = N_{\Pi\Gamma} + \frac{N_{CP} - \Pi}{i},$$

где N_{i2} — значение, записываемое в интегратор скорости контура углового положения $\Pi\Gamma$, $N_{\Pi\Gamma}$ — текущее угловое положение $\Pi\Gamma$, N_{CP} _Д — значение сигнала рассогласования в контуре углового положения ротора двигателя.

Подобное построение системы управления угловой скоростью вращения позволяет повысить чувствительность в режиме малых задаваемых скоростей и в то же время отрабатывать погрешности, связанные с несоосностью осей ПГ и двигателя, нежесткостью конструкции СГП и люфтом редуктора. При этом пересчет хранящихся в интеграторах скорости значений позволяет осуществить плавный переход работы ИЭП с одного датчика обратной связи на другой.

Библиографический список

- 1. *Трахтенберг Р. М.* Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. М.: Энергоиздат, 1982. 168 с.
- 2. Джукич Д. Й., Положенцев Д. С. Организация систем управления угловой скоростью с помощью индукционных датчиков угла // Молодежь. Техника. Космос: тр. VI Общероссийской молодеж. науч.-техн. конф. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. 2014. С. 185–186 с.
- 3. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

УДК 629.313.3

М. А. Волохов*

кандидат технических наук, доцент

В. П. Платонов*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ СКВТ

В статье рассмотрены подход к расчету технологических погрешностей и вопросы производственного контроля и диагностики качества СКВТ.

Ключевые слова: технологические погрешности, производственный контроль, диагностика.

M. A. Volokhov*

PhD. Tech., Associate Professor

V. P. Platonov*

PhD, Tech., Associate Professor *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DIAGNOSTICS OF RESOLVER MANUFACTURING ERRORS

The approach to the calculation of the resolver manufacturing errors and main points of the resolver manufacturing control and diagnostics are considered.

Keywords: resolver, manufacturing errors, control, diagnostics.

Технологическая составляющая погрешностей СКВТ определяется геометрической и электромагнитной асимметрией магнитопроводов статоров и роторов. Геометрическую асимметрию магнитопроводов, имеющую сложный характер, можно свести к сумме типовых асимметрий, таких как эллиптичности расточки статора и внешней поверхности ротора $(e_{\rm ck}, e_{\rm p})$, эксцентриситет статора и ротора g, бой ротора h.

Электромагнитная асимметрия возникает изза анизотропии магнитных свойств и наличия короткозамкнутых контуров магнитопроводов. Электромагнитная асимметрия может быть приведена к геометрической. Для улучшения точностных показателей и увеличения процента выхода СКВТ высоких классов на предприятиях организуются производственный пооперационный контроль, заключающийся в измерении геометрических размеров деталей и узлов, магнитных свойств магнитопроводов. Кроме того, организуется проверка намотанных роторов совместно с эталонным статором и намотанных статоров совместно с эталонным ротором. При таких проверках определяются погрешности ВТ: неравенство коэффициентов трансформации Δk , асимметрия нулевых точек $\Delta \alpha$, квадратурная и остаточная ЭДС e_k и e_o , погрешности выходных зависимостей ε_a , ε_l .

В [1] асимметрию магнитопроводов предлагается характеризовать с помощью изменений комплексной магнитной проводимости $\dot{\lambda} = \lambda_{\rm H} - j \lambda_{\rm H}$, причем вещественная часть $\lambda_{\rm H}$ определяется величиной индуктивного сопротивления намагничивания, а мнимая $\lambda_{\rm H}$ соответствует потерям в стали. Магнитные проводимости по осям d и q представляются в виде

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_{d} = \lambda_{0} (1 + \Delta \dot{\lambda}_{q} + \Delta \dot{\lambda}_{dq}); \\ \dot{\lambda}_{q} = \lambda_{0} (1 + \Delta \dot{\lambda}_{d} + \Delta \dot{\lambda}_{qd}), \end{cases}$$
(1)

где λ_0 — намагничивающая составляющая магнитной проводимости идеализированного ВТ, не имеющего асимметрии; $\Delta\dot{\lambda}_d$, $\Delta\dot{\lambda}_q$ — относительные изменения магнитных проводимостей по осям d и q; $\Delta\dot{\lambda}_{dq} = \Delta\dot{\lambda}_{qd}$ — относительные изменения магнитных проводимостей взаимоиндукции по осям d и q, обусловленные асимметриями магнитопровода.

Установлена связь между типовыми геометрическими асимметриями $e_{\rm c},\,e_{\rm p},\,g,\,h$ и относительными изменениями магнитных проводимостей [1].

$$\begin{cases} \Delta \lambda_{d} = -\frac{\varepsilon_{1}}{2} \cos 2\phi_{0}; \\ \Delta \lambda_{q} = \frac{\varepsilon_{1}}{2} \cos 2\phi_{0}; \\ \Delta \lambda_{dq} = -\frac{1}{2} \varepsilon_{1} \sin 2\phi_{0}; \\ \varepsilon_{1} = \frac{\Delta \delta_{1}}{\delta_{0}}; \\ \Delta \lambda_{d\max} = \Delta \lambda_{q\max} = \frac{\varepsilon_{1}}{2}; \\ \Delta \lambda_{dq\max} = \frac{\varepsilon_{1}}{2}. \end{cases}$$

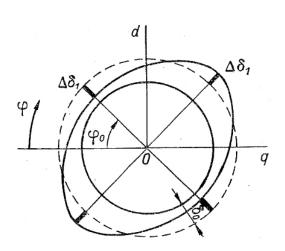
$$(2)$$

При наличии эллиптичности статора (рис. 1) При наличии эллиптичности ротора (рис. 2):

$$\begin{cases} \Delta \lambda_{d} = \frac{\varepsilon_{2}}{2} \cos 2\phi_{0}; \\ \Delta \lambda_{q} = -\frac{\varepsilon_{2}}{2} \cos 2\phi_{0}; \\ \Delta \lambda_{dq} = \frac{1}{2} \varepsilon_{2} \cos 2\phi_{0}; \\ \varepsilon_{2} = \frac{\Delta \delta_{2}}{\delta_{0}}; \\ \Delta \lambda_{d\max} = \Delta \lambda_{q\max} = \frac{\varepsilon_{2}}{2}; \\ \Delta \lambda_{dq\max} = \frac{\varepsilon_{2}}{2}. \end{cases}$$
(3)

При наличии эксцентриситета (рис. 3):

$$\begin{cases} \Delta \lambda_{d} = -\frac{\varepsilon^{2}}{4}; \\ \Delta \lambda_{q} = \frac{\varepsilon^{2}}{4}; \\ \Delta \lambda_{dq} = 0; \\ \varepsilon = \frac{\Delta \delta}{\delta \alpha}. \end{cases}$$
(4)



Puc. 1. Асимметрия воздушного зазора при эллиптичном контуре

При известных $\Delta\lambda_d, \Delta\lambda_q, \Delta\lambda_{dq}$ погрешности ВТ определяются по формулам (5):

$$\begin{cases} e_{k}\% = \frac{\Delta \lambda_{dq}}{\left|I + \dot{\gamma}_{f}\right|} 100\%; \\ \varepsilon_{fa} = 2\operatorname{Re}\left(\frac{\dot{\gamma}_{f}}{I + \dot{\gamma}_{f}} \Delta \dot{\lambda}_{dq}\right) 100\%; \\ e_{\operatorname{oct}} = \operatorname{Im}\left(\frac{\dot{\gamma}_{f}}{I + \dot{\gamma}_{f}} \Delta \dot{\lambda}_{dq}\right) 100\%; \\ \Delta \alpha = 2\operatorname{Re}\left(\frac{\dot{\gamma}_{f}}{I + \dot{\gamma}_{f}} \Delta \dot{\lambda}_{dq}\right), \end{cases}$$

$$(5)$$

где e_k – е. д. с. квадратурной обмотки; $e_{\text{ост}}$ – остаточная э. д. с.; $e_{\text{ост}}$ – остаточная э. д. с.; ε_{fa} – функ-

циональная погрешность;
$$\dot{\gamma}_f = \frac{r_f + j x_{fs}}{j x_m}$$
 — относи-

тельный параметр обмотки возбуждения.

Используя выражения (2), (3), (4) и (5), можно получить формулы вычисления погрешностей СКВТ в следующем виде.

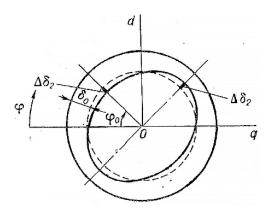


Рис. 2. Асимметрия воздушного зазора при эллиптичном роторе

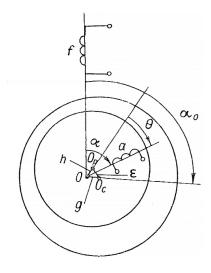


Рис. 3. Зависимость воздушного зазора от угла по расточке при наличии эксцентриситета

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

	Элл. статора $e_{ m c}$	Элл. ротора $e_{ m p}$	Эксцентр. бой рот. g+h	к. з. контур статора	к. з. контур ротора
$e_{_{ m K}}\%_{_{ m noct}}$	+	_	_	+	_
$e_{\kappa}\%$ перем	_	+	_	_	+
$\varepsilon_{fa}\%$	_	1	+	_	_
$\epsilon_{fb}\%$	_	+	+	_	+
$e_{ka}\%$	+	_	+	+	_
е ост %	+	+	_	+	+
$\Delta \alpha_{fab}$	_	+	_	_	+

Связь типовых технологических несовершенств с показателями точности СКВТ

При эллиптичности в расточке статора:

$$\begin{cases} e_{k}\% = \frac{50\varepsilon_{1}}{\left|1 + \dot{\gamma}_{f}\right|} \sin 2\varphi_{0}; \\ e_{fa}\% = 50 \frac{x_{fs}}{x_{m}} \varepsilon_{1} \cos(\alpha - 2\varphi_{0}); \\ e_{\text{oct}}\% = 50 \frac{r_{f}}{x_{m}} \varepsilon_{1} \sin 2\varphi_{0}; \\ \Delta\alpha = 0. \end{cases}$$

Так как изменение $e_{fa}\ \%$ имеет косинусоидальный характер, относительная амплитудная ошибка может быть сделана равной нулю выбором точки отсчета.

При эллиптичности внешней поверхности ротора:

$$\begin{cases} e_k\% = 50\varepsilon_2 \sin 2\varphi_0 = 50\varepsilon_2 \sin 2(\alpha - \theta_2); \\ \varepsilon_{fa}\% = 50 \frac{x_{fs}}{x_m} \varepsilon_2 \cos(\alpha - 2\theta_2); \\ e_{\text{oct}}\% = 50 \frac{r_f}{x_m} \sin 2\theta_2; \\ \Delta\alpha = \frac{x_{fs}}{x_m} \varepsilon_2 \sin \theta_2. \end{cases}$$

$$(7)$$

При наличии одновременно эксцентриситета статора и ротора и боя ротора:

$$\begin{cases} e_{h}\% = 0; \\ \varepsilon_{fa}\% = 50 \frac{gh}{\sigma_{0}^{2}} \cdot \frac{x_{fs}}{x_{m}}; \\ e_{\text{OCT}}\% = 0; \\ \Delta\alpha = 0. \end{cases}$$
(8)

Анализ формул (1)...(5) показывает, что эллиптичности расточек статора и ротора не отражаются на погрешности воспроизведения синусоидальной зависимости ε_0 , но вызывают появление квадратурной е. д. с. e_k , асимметрии нуле-

вых точек $\Delta\alpha$ и остаточной е. д. с. $e_{\text{ост}}$. Наличие эксцентриситета статора и ротора дает погрешность функциональной зависимости ϵ_0 и не влияет на появление e_k , $e_{\text{ост}}$, $\Delta\alpha$.

Компьютерное моделирование подтверждает эти выводы [2]. В таблице показана связь типовых технологических несовершенств с показателями точности СКВТ.

Анализ таблицы позволяет предположить следующий алгоритм диагностики технологических дефектов СКВТ. Вначале по величине e_k пост и e_k пер определяется, какая конструктивная часть СКВТ (статор, ротор или оба вместе) имеют существенные технологические дефекты. Затем путем анализа погрешностей ε_{fa} , ε_{fb} , ε_{ka} , $e_{\text{ост}}$, $\Delta \alpha$ определяется, существенную ли величину имеют эллиптичность статора (ротора) — ее влияние смешано с влиянием короткозамкнутых контуров статора (ротора), а также эксцентриситет статора и бой ротора.

Результаты анализа могут быть использованы при организации пооперационного контроля в производстве, а также в учебном процессе при изложении дисциплин: «Диагностика электрических микромашин», «Контроль качества технологических операций», «Контроль качества и испытание продукции», «Контроль и диагностика электромеханических и электроэнергетических систем и комплексов».

Библиографический список

- 1. Хрущев В. В. Электрические микромашины переменного тока для устройств автоматики. Л.: Энергия, 1969.
- 2. Тазов Г. В., Богданов В. И. Моделирование технологических дефектов поворотных трансформаторов // Электромашинные элементы автоматики. Вып. 116. Л.: ЛИАП. 1977. С. 8–14.

УДК 541.124:542.952.6:547.313

Е. А. Киселева*

кандидат технических наук

Ф. В. Лелин*

лаборант

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ¹

Прогресс в области различных технологий накопления электрической энергии и развитие технологий возобновляемой энергетики позволяют решать различные задачи с помощью накопителей новых типов в составе солнечных и ветровых энергоустановок. Для компенсации пиковых нагрузок, характеризующихся высокими токами разряда аккумуляторов (например, пусковые токи мощных электродвигателей), по аналогии с гибридными установками электротранспорта могут быть применены суперконденсаторы. Структура электрода влияние, на саморазряд и срок службы суперконденсатора.

Ключевые слова: накопители энергии, электроды, активированный уголь.

E. A. Kiseleva*

PhD, Tech.

F. V. Lelin*

Laboratory Assistant

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (OIVT RAS), Moscow

INVESTIGATION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF ELECTRONS OF ENERGY DRINKS USED IN ENERGY INSTALLATIONS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Progress in the field of various technologies for the accumulation of electrical energy and the development of renewable energy technologies make it possible to solve various problems with the help of new types of accumulators in the composition of solar and wind power installations. To compensate for peak loads characterized by high discharge currents of batteries (for example, starting currents of high-power electric motors), supercapacitors can be used, in analogy with hybrid electric transport installations. The structure of the electrode affects the self-discharge and lifetime of the supercapacitor.

Keywords: energy accumulators, electrodes, activated carbon.

В настоящее время проблема энерго- и ресурсосбережения как в России, так и в мире стоит достаточно остро. Растущие потребности в электрической энергии заставляют искать ее новые источники и оптимизировать потребление энергии, получаемой от традиционных систем. Известно, что большинство возобновляемых источников энергии отличается существенными суточными и сезонными неравномерностями

генерации, причем для ветровых энергоустановок характерны флуктуации со временем жизни от долей до нескольких секунд [1]. Если длительные пики и спады генерации мощности могут быть компенсированы электрохимическими аккумуляторами, то для повышения качества выдаваемой электроэнергии оптимальным решением является двойнослойный электрохимический суперконденсатор (ДСК). Задача по-

 $^{^{1}}$ Работа выполнена в ОИВТ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект номер 14-50-00124).

давления флуктуаций характерна также и для дизель-генераторных установок, составляющих основу современной распределенной генерации.

В ряде случаев повышение срока службы и снижение стоимости могут быть достигнуты комбинированием аккумуляторов с ДСК в составе энергетической установки. Похожие схемы используются и в электротранспортных средствах [2].

В такой схеме аккумуляторы обеспечивают энергопитание потребителя в базовом режиме при отсутствии ВИЭ, а переходные процессы компенсируются ДСК [3]. Суперконденсаторы могут быть использованы и в системах питания тех потребителей, электрическая нагрузка которых носит явно импульсный характер [4].

Суперконденсатор представляет собой импульсное электрохимическое устройство, являющееся преимущественно источником мощности. От аккумуляторов различных типов он отличается существенно меньшей энергоемкостью (единицы Вт.ч/кг) и повышенной удельной мощностью (2-10 кВт/кг). Отсутствие фарадеевских процессов при работе ДСК приводит к увеличению его ресурса по сравнению с аккумуляторами, а также к отсутствию ограничений по глубине его разряда [5]. ДСК используются для сглаживания импульсных нагрузок, рекуперации энергии торможения или других аналогичных процессов, требующих высоких значений токов заряда или разряда. Для удовлетворительного функционирования ДСК необходимо присутствие в его активных слоях микро- и мезопор, которые вкупе обусловливают большую величину удельной поверхности и, соответственно, электрической емкости. Но при заряде (разряде) большими токами в течение ограниченного времени может иметь место ситуация, когда большая доля поверхности микропор окажется незаряженной (неразряженной).

Какова роль макропористой структуры электродов в решении данной проблемы? Принято считать, что макропоры создают в активном слое канал для подачи ионов электролита. Но и мезопоры, и даже микропоры также вносят свой вклад в величину эффективной проводимости электролита. Если убрать макропоры, то, как показывают оценки, проводимость снизится, но не катастрофически. В общем случае в электродах ДСК обычно присутствуют все три типа пор: макропоры, мезопоры и микропоры. В работе [6] структуры с тремя типами пор изучались методами теории пористых электродов и компьютерного моделирования. Из предложенной в данных работах теоретической модели следует, что при уменьшении доли макропор в структуре электродов величина удельной емкости может существенно возрасти, даже если удельная поверхность не возрастает, а эффективная проводимость электролита снижается. Этот результат в настоящей работе был проанализирован на основе экспериментальных данных.

Электроды главным образом определяют свойства суперконденсаторов. Поэтому выбор материала электрода и технологии его приготовления чрезвычайно важен для достижения высоких значений удельной мощности и энергии [7-8]. При использовании активированных углей (АУ) для электродов двойнослойных суперконденсаторов актуальна задача оптимизации пористой структуры угля. Варьируя условия химической активации, можно контролировать объем и распределение пор по размерам, природу и количество функциональных групп на поверхности. Ранее авторами было исследовано влияние времени и температуры активации, массового соотношения активирующего агента и исходного сырья на параметры пористой структуры, активированного угля: удельную поверхность, объем пор и их распределение по радиусам, а также на электрохимические характеристики СК с водным (4,9 М серная кислота) и органическим электролитами (1 М тетраэтиламмония тетрафторборат) на основе данных материалов [9].

В данной работе основное внимание уделялось исследованию влияния макропористой структуры электродов СК на их электрохимические характеристики.

Экспериментальная часть. Из сказанного выше следует общая для описания принципов функционирования ДСК важная, пока еще никем не проанализированная проблема - описание влияния на величину удельных характеристик ДСК содержания макропор в пористой структуре АУ. Чтобы продемонстрировать, как наличие значительного излишнего количества макропор в АУ сказывается на величинах удельных характеристик ДСК, в работе оценивали общий объем пор. В электроде его оценивали с помощью объемно-весового метода, а также из массы и геометрического объема сухого электрода. В дополнение к этому измеряли объем электролита в электродах после измерения характеристик модельных ячеек суперконденсаторов. Соответственно, объем макропор в электроде определяли по разнице суммарного измеренного объема и объема микро- и мезопор, определенных из данных метода ЛИ.

При определении объема макропор в образцах угля было найдено, что суммарный объем измеренных пор радиусом менее 100 нм методом лимитированного испарения находится в близком согласии с данными, полученными объемновесовым методом. Кроме того, на микрофотографиях соответствующего увеличения в частицах синтезированного в работе угля макропор не наблюдается, в отличие, например, от коммерческих углей из скорлупы кокоса.

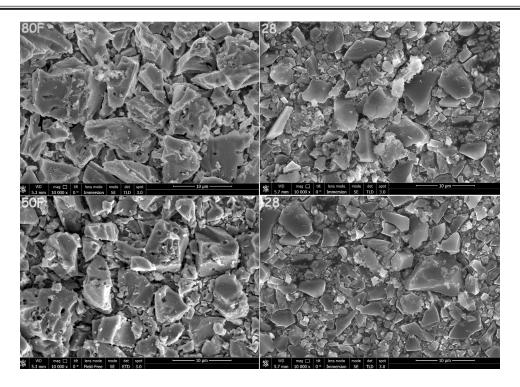


Рис. 1. Микрофотографии частиц угля: Кигагау ҮР-50F, ҮР-80F – слева; АУ из отходов древесины – справа

На рис. 1 и 2 (слева) в дополнение к изображениям одного из образцов, разработанных АУ, представлены изображения образцов углей Kuraray YP-50F и YP-80F, полученных из скорлупы кокоса.

На этом основании мы считаем, что в наших активированных углях доля макропор незначительна. В то же время в электродах макропоры, образованные промежутками между частицами угля (и в меньшей степени связующего), практически неизбежны. Общее количество электролита в электроде на основе АУ из ольхи, сосредоточенного в микро-, мезо- и макропорах, по нашим оценкам должно быть на уровне 1,4 см³/г для до-

стижения максимальных характеристик. При этом мезо- и макропоры электрода, представляющие собой промежутки между частицами, обеспечивают транспортную доступность ионов к каждой частице. Избыточное же количество макропор и, соответственно, электролит в них является балластом. Эти поры не вносят вклад в формирование ДЭС, а масса и объем электролита ухудшают удельные массовые и объемные характеристики суперконденсаторов.

Сделанные выводы для электродов можно подтвердить экспериментально. Далее (рис. 3) представлены экспериментальные результаты для большой серии различных образцов элек-

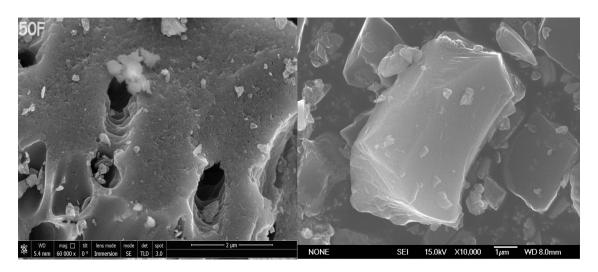


Рис. 2. Микрофотографии частицы угля: Kuraray YP-50F – слева; AУ из отходов древесины – справа

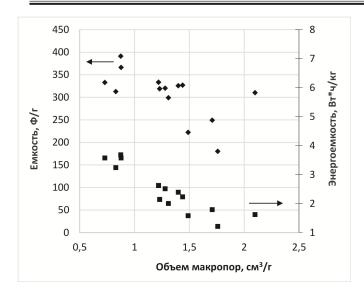


Рис. 3. Зависимость: ■ — удельной энергоемкости в расчете на суммарную массу электродов и электролита и ◆ — электрической емкости от объема макропор в электроде ДСК

тродов и активированных углей по влиянию присутствия макропор на электрохимические характеристики ДСК. Как было указано выше, электроды изготавливались методом каландрирования. Такой способ изготовления электродов не позволяет полностью избавиться от макропор. Данные результаты представляют собой статистическую обработку большого числа независимых экспериментов, проведенных в течение длительного времени, по изучению главным образом влияния параметров синтеза на электрохимические характеристики углей. Кроме того, могли отличаться особенности технологии изготовления электродов, могли изменяться размеры частиц угля, содержание связующего, добавок сажи и др. Таким образом, объем макропор в каждом электроде являлся следствием разнородных и часто случайных причин.

На рис. З представлены экспериментальные корреляционные зависимости: по оси X отложены величины объема макропор в электроде, а по оси У – удельная энергоемкость (правая ось) в расчете на суммарную массу электродов с электролитом и удельная электрическая емкость (левая ось) в расчете на грамм сухого активированного угля. Несмотря на объяснимый в свете вышесказанного разброс, из графиков явно видно, что повышение объема макропор сопровождается снижением удельных электрохимических характеристик.

Частичное падение энергоемкости на рис. 3 достаточно легко объяснить. Так как данная величина определялась в расчете на суммарную массу электродов с электролитом, то чем больше в электроде макропор, тем большее количество электролита он содержит, тем выше знаменатель и тем ниже будут удельные характеристи-

ки. Ведь вклада в поверхность и, соответственно, в емкость ДЭС макропоры практически не вносят. Тем не менее, все уменьшение удельной энергоемкости (до трех раз) только за счет увеличения в знаменателе массы электролита (около 2,5 раз) с учетом массы электрода объяснить нельзя.

Что касается электрической емкости в расчете на массу сухого угля, то здесь, исходя из общих соображений, связь с макропорами должна была бы быть скорее обратной, так как макропоры повышают эффективную электропроводность электролита. По всей видимости, реализуется такая пористая система, в которой избыточный объем макропор препятствует заряду и разряду части частиц угля, способствуя их изоляции от других частиц. С учетом того, что в системе помимо макропор присутствуют нити и агрегаты частиц фторопласта, более изолированные частицы могут иметь плохой электрический контакт по твердой фазе углеродного материала. Если при заряде эти затруднения можно хотя бы частично компенсировать выдержкой при максимальном напряжении (что реализуется на практике, когда суперконденсаторы в рабочей схеме находятся под напряжением), то воздействовать с этой целью на разряд нельзя.

Таким образом, в качестве рабочей гипотезы можно предположить, что при избытке макропор часть микропор в более изолированных частицах остается незаряженной или недоразряженной. Вследствие этого наблюдается заметное падение емкости в расчете на массу сухого угля при увеличении доли макропор. При этом более правильной характеристикой, от которой зависит емкость, должен быть не объем, а поверхность макропор и агрегатов фторопласта.

В результате проведенных исследований созданы высокоэффективные активированные угли из отходов древесины, предназначенные для использования в суперконденсаторах. Установлены корреляции между параметрами режима термохимической активации древесины, пористой структуры синтезированных активированных углей и электродов на их основе и удельными характеристиками суперконденсаторов.

Основная часть работы посвящена определению оптимальной пористой структуры разрабатываемых активированных углей. Показано, что основной объем пор приходится на радиус около 1 нм. При этом объем пор данных размеров на уровне 0,6 см³/г достаточен для обеспечения высоких энергетических характеристик суперконденсаторов. В работе получена высокая удельная емкость двойного электрического слоя на уровне 390 Ф/г в суперконденсаторах с серной кислотой в качестве электролита. Данная величина является очень высоким показателем, соответствующим и даже превосходящим мировой уровень.

На наш взгляд, получение столь высоких удельных характеристик стало возможным благодаря главным образом возможности оперативного контроля параметров пористой структуры синтезируемых углеродных материалов, достигнутого с помощью метода лимитированного испарения. При этом при выборе главных параметров синтеза АУ преследовались две главные цели: во-первых, необходимо было добиться по возможности более высокого насыщения удельного объема АУ микропорами и мезопорами, вовторых, требовалось всемерно снижать в АУ количество избыточного, балластного электролита.

Библиографический список

- 1. Pickard William F., Shen Amy Q., Hansing, Nicholas J. Parking the power: strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply-demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. No. 13. Pp. 1934–1945.
- 2. Stienecker Adam W., Stuart Thomas, Ashtiani Cyrus. An ultracapacitor circuit for reducing sulfation in lead acid batteries for mild hybrid electric vehicles // Journal of Power Sources. March, 2006. Vol. 154. Iss. 2. 21. Pp. 561–566.
- 3. Andreotti A., Mottola F., Pagano M., Velotto G. Design of ultracapacitor based filter for isolated PV source feeding pulsing load // Electric Power Systems Research. June 2008. Vol. 78. Iss. 6. Pp. 1038–1046.

- 4. Hande Abhiman, Polk Todd, Walker William, Bhatia Dinesh. Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes // Microprocessors and Microsystems. 2007. No. 31. Pp. 420–432.
- 5. Деньщиков К. К. Оптимизация взаимодействия наноструктурированных углеродных материалов и электролитов на основе ионных жидкостей для повышения электроэнергетических характеристик суперконденсаторов // Тр. междунар. форума по нанотехнологиям (Роснанофорум). М., 2008.
- 6. Чирков Ю. Г., Ростокин В. И. Компьютерное моделирование активных слоев двойнослойного бипористого суперконденсатора: оптимизация режимов разряда и параметров структуры активного слоя, расчет габаритных характеристик // Электрохимия. 2014. Т. 50 (3). С. 235.
- 7. Нанопористые активированные угли для суперконденсаторов с водным и органическим электролитами / M.A. Журилова, U.A. Янилкин, E.A. Киселева и $\partial p.$ // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2017. С. 82–87.
- 8. Kiseleva E. A., Lelin F. V., Zhurilova M. A., Shkolnikov E. I. Ways to form electrodes for supercapacitors with aqueous and organic electrolytes and specific features of these methods // Russian Journal of Applied Chemistry. 2017. Pp. 712–715.
- 9. Effect of Porous Structure of Activated Carbon Electrodes on Characteristics of Double-Layer Supercapacitors / E. I. Shkolnikov, E. A. Kiseleva, D. E. Vervikishko etc. // RUSS J APPL CHEM. 2017. Pp. 547–552.

УДК 621.313.126

Д. В. Кукушкин

ведущий инженер-конструктор ПАО «Силовые машины»

СПОСОБ ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗБУДИТЕЛЯ

В статье рассмотрены современные способы гашения поля синхронных генераторов, приведен расчет гашения поля на конденсатор большой емкости.

Ключевые слова: система возбуждения, вращающийся возбудитель, гашение поля.

D. V. Kukushkin

Leading Design Engineer PJSC "Power Machines"

FIELD SUPPRESSION METHOD OF THE ROTATING EXCITER FIELD WINDING

The article presents the modern methods of the field suppression of the synchronous machines, shown calculation of the field suppression on the capacitor with the large capacity.

Keywords: excitation system, rotating exciter, field suppression.

Гашение поля обмотки возбуждения является главным способом минимизации ущерба при аварийных режимах работы синхронных генераторов. Проблема гашения поля наиболее актуальна для бесщеточных генераторов, в цепи которых, как правило, отсутствует коммутационная аппаратура. Большинство производителей устанавливают цепи гашения поля только в статической системе возбуждения индуктора, а поле обмотки ротора синхронного генератора затухает с естественной постоянной времени T'_{d0} .

Гашение поля на постоянное или нелинейное сопротивление

В настоящее время наиболее широкое распространение получило гашение поля на постоянное [1] или нелинейное [2] разрядное сопротивление. Принцип действия данного метода приведен на рис. 1. При этом способе коммутационные аппараты, так называемые выключатели поля, замыкают обмотку возбуждения на разрядное сопротивление, после чего размыкают главные контакты. Вся энергия, запасенная в магнитном поле обмотки, выделяется в виде тепловой энергии на разрядном сопротивлении.

Данный способ гашения является надежным и недорогим решением, однако поле возбуждения затухает относительно медленно.

Нелинейное сопротивление (варистор), используемое в статических системах возбуждения генераторов большой мощности, представ-

ляет собой блоки, собранные из параллельно соединенных дисков карбида кремния SiC (рис. 2).

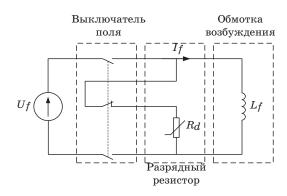


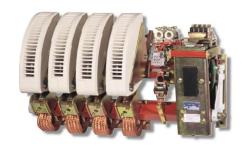
Рис. 1. Гашение поля на активное или нелинейное сопротивление



Рис. 2. Внешний вид блока SiC варисторов

a)





Puc. 3. Внешний вид выключателей поля: a – Gerapid (GE); б – CEX (Mersen)

Свойства нелинейных разрядных сопротивлений за последние 50 лет улучшились по сравнению с указанными в [1], однако время гашения поля на нелинейное сопротивление все еще превышает оптимальное [1]. Широкое применение варисторов на рынке Российской Федерации ограничивают высокая стоимость и длительные сроки поставки. Кроме того, цепи гашения (выключатель поля и варисторы) обладают значительными габаритными размерами и требуют квалифицированного обслуживания (рис. 3). Однако многие импортеры систем возбуждения применяют данное решение на объектах электроэнергетики Российской Федерации.

Гашение поля на дугогасительную решетку АГП

На территории Российской Федерации и стран СНГ широкое распространение получил метод гашения поля на дугогасительую решетку. Данный метод применяется в аппарате гашения поля (АГП) [1], выпускаемом филиалом ПАО «Силовые Машины» завода «Электросила». Кроме того, в 1960-х годах XX века технология изготовления АГП была освоена в КНР [4] и далее развивалась независимо от отечественной. Принцип действия показан на рис. 4. При этом способе энергия, запасенная в обмотке возбуждения, преобразуется в электрическую дугу, горящую на медных пластинах дугогасительной решетки, и далее в тепло.

К преимуществам применения АГП можно отнести компактные размеры и высокую скорость гашения поля, близкую к оптимальной. Скорость гашения поля является главным критерием, влияющим на снижение ущерба при внутренних коротких замыканиях синхронных генераторов.

К недостаткам АГП можно причислить сложность изготовления и отсутствие исполнений на

низкие токи возбуждения. В [4] среди недостатков АГП указаны сложность обслуживания, однако обслуживание любого электрического аппарата занимает значительное время, а в некоторых случаях [5] и привлечение сертифицирован-

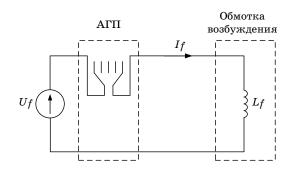


Рис. 4. Гашение поля на дугогасительную решетку



Рис. 5. Внешний вид АГП

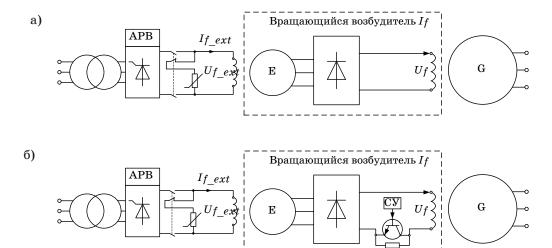


Рис. 6. Гашение поля бесщеточного генератора: а— гашение поля только возбудителя; б— гашение поля возбудителя и генератора

ных специалистов завода-изготовителя с периодичностью раз в 5 лет.

В [3] отмечались отказы в работе АГП, произведенных в КНР. Однако за 60 лет применения АГП, выпускаемых филиалом ПАО «Силовые Машины» завода «Электросила», не было зафиксировано отказов во время гашения поля при соблюдении руководств по монтажу и эксплуатации (рис. 5).

Гашение поля генератора на вращающееся сопротивление

На протяжении последних 30 лет производители бесщеточных синхронных генераторов ищут эффективный способ гашения поля обмотки возбуждения. Известны решения, при которых цепи гашения устанавливались непосредственно во вращающихся возбудителях (рис. 6) [6, 7].

Данный способ обладает значительным преимуществом в скорости гашения поля, так как он воздействует непосредственно на поле генератора, а не возбудителя, но при реализации этого метода необходимо выполнить ряд сложных технических задач, среди которых:

- 1. Надежная передача сигнала управляющего воздействия на ключи вращающегося выпрямителя и цепей гашения;
- 2. Эффективный отвод тепла, выделяющегося при гашении поля синхронного генератора;
- 3. Обеспечение механической прочности полупроводниковых ключей и нелинейных сопротивлений (варисторов).

Ряд этих задач был частично решен в работе [7] для гидрогенератора мощности 20 МВА с частотой вращения 250 об/мин. Однако для внедрения данного способа гашения поля в турбогенераторах мощностью свыше 60 МВА и частотой вращения свыше 1500 об/мин эти задачи должны быть решены полностью.

Гашение поля возбудителя генератора на электрическую емкость

На протяжении более чем 60 лет в [1], [4] отмечалась перспективность гашения поля на электрическую емкость, но ограничивающим фактором являлось отсутствие конденсаторов необходимой емкости и напряжения. Однако современный уровень производства конденсаторов уже позволяет применять их для гашения поля возбудителей бесщеточных генераторов. Принцип действия показан на рис. 7.

Импульсы управления тиристорного выпрямителя блокируются, контакты выключателя поля размыкаются, и кратковременно подается сигнал на отпирание тиристора VS_d . В контуре обмотки возбуждения L_f и разрядного конденсатора C_d начинается колебательный разряд. При прохождении тока через ноль тиристор VS_d запирается, то есть за четверть периода колебаний вся магнитная энергия, запасенная в обмотке возбуждения, должна преобразоваться в электрическую энергию заряда конденсатора C_d .

Ток и напряжения на обмотке возбуждения приведены в формулах (1).

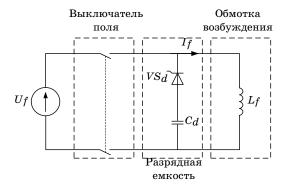


Рис. 7. Гашение поля на электрическую емкость

$$i_f(t) = I_f \cos \frac{t}{\sqrt{L_f C_d}};$$

$$u_f(t) = I_f \sqrt{\frac{L_f}{C_d}} \sin \omega t - U_f. \tag{1}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_f C_d}} = \frac{2\pi}{T}; \ T = 2\pi \sqrt{L_f C_d}.$$
 (2)

Величина разрядной емкости конденсатора определяется энергией, запасенной в обмотке возбуждения, и максимально допустимым напряжением на обмотке возбуждении U_m :

$$\frac{L_f I_f^2}{2} = \frac{C_d \left(U_m + U_f \right)^2}{2}; \tag{3}$$

$$C_d = L_f \frac{I_f^2}{\left(U_m + U_f\right)^2}. (4)$$

Полное время гашения поля будет определяться формулой

$$t_m = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_f C_d} = \frac{\pi}{2} \frac{L_f I_f^2}{\left(U_m + U_f\right)^2}.$$
 (5)

Приняв, что
$$I_f=U_f/r_f$$
, а $\tau=L_f/r_f$, получим:
$$t_m=\frac{\pi}{2}\tau\frac{U_f}{U_m+U_f}. \tag{6}$$

Разработана модель в $MatLab\ Simulink$ щита возбуждения ЩВ45 с бесщеточным возбудителем БВД-240-3000, поставляемого ПАО «Силовые машины» для возбуждения турбогенератора ТЗФП802МУЗ. Моделирование показывает, что в соответствии с требованиями [8] поле возбудителя БВД-240-3000 генератора ТЗФП802МУЗ из режима двукратной форсировки на холостом ходу может быть погашено за $0,196\ \tau$ при отношении U_m/U_f =7.

Данный метод, с одной стороны, позволяет экономить на мощности трансформатора возбуждения, так как величина обратного напряжения, прикладываемого к обмотке возбуждения, не зависит от мощности трансформатора возбуждения, с другой стороны, позволяет погасить поле с высокой скоростью. Элементы цепей гашения не требуют дорогостоящего технического обслуживания и обладают высокой надежностью.

Из недостатков данного метода можно отметить все еще высокую стоимость конденсаторов. Однако производство конденсаторов большой емкости развивается как за рубежом, так и в Российской Федерации, что позволит в будущем снизить стоимость конденсаторов и применять данный способ гашения поля возбудителей и синхронных генераторов.

Сравнение времени гашения поля различными способами

В таблице приведен сравнительный анализ продолжительности процесса гашения поля генератора на холостом ходу по сравнению с оптимальным временем гашения $t_{\rm ont}$, определенным в [1].

Из результатов, приведенных в таблице, видно, что скорость гашения поля АГП является наиболее близкой к оптимальной, однако его применение в щите возбуждения с малыми номинальными токами невозможно.

Гашение на нелинейное сопротивление показывает хороший результат, но стоимость реализации данного метода не позволят широко применять его в РФ.

Метод гашения поля на электрическую емкость позволяет быстро погасить поля возбудителя, уменьшив тем самым и скорость гашения поля синхронного генератора. Применение конденсатора большой емкости в цепях гашения по-

Сравнение времени гашени	я поля различными способами
--------------------------	-----------------------------

№	Способ гашения поля	Общее выражение $t_{\it m}$	t_m	$k=U_m/U_f$	$t_m/t_{ m ont}$
1	Оптимальные условия гашения поля	$\frac{1}{k+1}\tau$	$0,\!125\tau$	7	1
2	АГП	${ m ln}rac{k+1}{k} au$	0,134τ	7	1,07
3	Разрядка на нелинейное сопро- тивление	$\frac{5}{\big(5\!-\!1\big)\!\big(k\!+\!1\big)}^{\hskip1pt\tau}$	0,156τ	7	1,25
4	Разрядка обмотки на электриче- скую емкость	$\frac{\pi}{2\big(k\!+\!1\big)}\tau$	0,196τ	7	1,57
5	Разрядка на постоянное сопро- тивление	$\frac{4,65}{k+1}\tau$	$0,582\tau$	7	4,65
6	Инвертирование тиристорного выпрямителя	$\ln rac{k+1}{k} au$	0,693τ	1	5,55

ля упрощает изготовление и эксплуатацию системы возбуждения.

На сегодняшний день широкое применение этого метода гашения поля для статических систем возбуждения большой мощности ограничено отсутствием на рынке конденсаторов необходимой емкости и напряжения. Однако для небольших систем возбуждения вращающихся возбудителей турбогенераторов мощностью до 80 МВт требуется конденсатор относительно небольшой емкости до 2,2 мФ.

Библиографический список

- 1. *Брон О. Б.* Автоматы гашения магнитного поля // Библиотека по автоматике. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. Вып. 34. 138 с.
- 2. Taborda J. Modern technical aspects of Field Discharge equipment for excitation systems // Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008. Pp. 1–8.
- 3. Disc Introduction // Metrosil. 2010. URL: https://www.metrosil.com/wp-content/uploads/2017/05/Metrosil-Exciter-Discharge-Applications.pdf (дата обращения: 07.11.2017).

- 4. Xianming C., Wei W., Hongshui L., Guohua, Xiaodong Z. New De-excitation Method for Large Hydraulic Generator // Journal of International Council on Electrical Engineering. 2011. Vol. 1. No. 2. Pp. 234–240.
- 5. High Speed DC Circuit Breaker Gerapid 2607, 4207, 6007, 8007 with arc chute 1X2, 1X4, 2X2, 2X3, 2X4 USER'S GUIDE // GE Consumer & Industrial GmbH. 2008. No. 1. URL: http://apps.geindustrial.com/publibrary/ checkout/S47183-e-01-2008?TNR=Installation%20and%20 Instruction%7CS47 183-e-01-2008%7CPDF&file name=S47183-e-01-2008.pdf (дата обращения: 06.12.2017)
- 6. Asea Brown Boveri, Claes Ivarsson. Method and device fordemagnetizing brushless synchronous machines. Patent PCT/SE1993/000244 1993.
- 7. Platero C. A., Redondo M., Blázquez F., Frías P. High-speed deexcitation system for brushless synchronous machines // Electric Power Applications, IET. March 2012. Vol. 6. No. 3. Pp. 156, 161.
- 8. ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. М., 2003. 19 с.

УДК 621.314

А. А. Мартынов*

кандидат технических наук, доцент

О. Б. Чернышева*

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОГЕНЕРАТОРА ПОПЛАВКОВОГО ТИПА

В работе представлена методика расчета параметров волногенератора поплавкового типа.

Ключевые слова: волногенератор, поплавок, пружина, механическая подсистема, электрическая подсистема.

A. A. Martynov*

PhD, Tech., Associate Professor

O. B. Chernysheva*

Senior Lecturer

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

TO THE CALCULATION OF THE FLOAT TYPE WAVE GENERATOR PARAMETERS

The method of calculation of parameters of float type wave generator is presented. **Keywords:** wave generator, float, spring, mechanical subsystem, electrical subsystem.

Волногенераторы преобразуют энергию морских волн в электрическую энергию [1, 2, 3]. Энергия морских волн практически беспредельна. В настоящее время в ряде стран, таких как Китай, Турция, США и других, ведутся успешные разработки волногенераторов большой мощности. Наряду с этим ведутся разработки и волногенераторов малой мощности. Подобные генераторы находят широкое применение в системах питания метеобуев, буев связи, маяков и т. п. Их основное назначение — подзарядка аккумуляторов или дозарядка накопительных конденсаторов источников питания, которые установлены на перечисленных выше автономных объектах. Мощность таких генераторов десятки и сотни ватт.

Отметим одну из особенностей работы поплавкового волногенератора, которую следует учитывать при их разработке. Период колебания морской волны $T_{\rm B}$ может находиться в пределах от 4 до 10 с. Следовательно, частота колебаний волны $f_{\rm B}$ =0,1–0,25 Гц. С такой же частотой перемещается и поплавок волногенератора. Выполнить волногенератор на такую частоту практически невозможно из-за существенного увеличения массы и габаритов генератора. Для практической реализации волногенератора рабочая частота генератора должна быть увеличена не

менее чем в 20–40 раз. Увеличить частоту ЭДС генератора можно с помощью механического редуктора, встроенного в конструкцию генератора.

Очевидно, что это решение приводит к увеличению массы и объема генератора и уменьшению его надежности и срока службы. Рассмотрим другой способ решения этой задачи, а именно: повышение частоты ЭДС генератора посредством электромагнитной редукции. Волногенератор можно представить устройством, содержащим две подсистемы — механическую и электрическую. На рис. 1 приведена конструктивная схема волногенератора с электромагнитной редукцией. Рассмотрим основные этапы расчета волногенератора с электрической редукцией.

Волногенератор представляет собой цилиндрическую трубу 3, длиной $L_{\rm K}$, внутри которой перемещается магнитоэлектрический индуктор 4 с многополюсной магнитной системой. Корпус редуктора зафиксирован и лишен возможности совершать какие-либо перемещения по вертикальной оси. Внутри трубы размещен сердечник магнитопровода статора 5 с обмоткой. Индуктор жестко связан с поплавком 1 штоком 2. При возвратно-поступательном движении поплавка индуктор перемещается вдоль сердечника статора и наводит в его обмотке ЭДС.

При реализации электромагнитной редукции активная зона генератора $l_{\rm a}$ должна быть удлинена и равна $l_{\rm a}$ = τ $\kappa_{\rm n}$,

где τ — полюсное деление магнитной цепи; $\kappa_{\rm p}$ — коэффициент электромагнитной редукции.

Длина корпуса волногенератора $L_{\rm K}$ с электромагнитной редукцией должна быть не менее чем $L_{\rm K}$ =т $\kappa_{\rm D}$ +4A, где A – амплитуда волны.

Частота генерируемой ЭДС до требуемого значения увеличивается за счет обеспечения условий для колебательного процесса подвижной части волногенератора, в состав которой входят жестко соединенные между собой поплавок, шток и индуктор. Для этой цели на штоке волногенератора сверху и снизу подвижной части волногенератора размещены две пружины, размещенные так, как это показано на рис. 1. Эти колебательные движения подвижной части генератора возможны только на тех интервалах времени, когда поплавок полностью освобождается от соприкосновения с водой, то есть когда имеет место впадина волны. Форма колебательного процесса механической подсистемы волногенератора, возникающего на этом интервале периода волна, приведена на рис. 2.

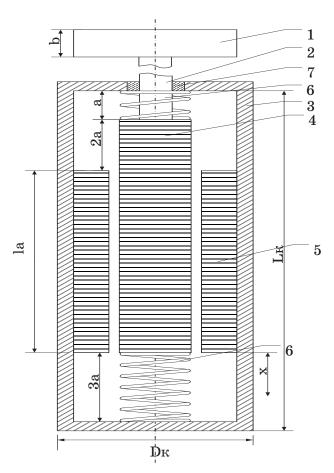


Рис. 1. Конструктивная схема волногенератора поплавкового типа с электромагнитной редукцией

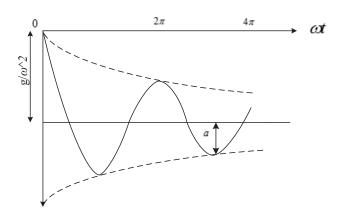


Рис. 2. Форма колебательного процесса механической подсистемы волногенератора

Рассмотрим режим колебаний механической подсистемы с пружинами при прохождении морской волны.

В погруженном состоянии поплавка на индуктор генератора действуют три силы [4]:

$$F_{\text{non}} = G + F_{\text{np}}, \tag{1}$$

-G=mg — сила тяжести подвижной части генератора; $F_{\text{попл}}=nmg$ — подъемная сила поплавка; $F_{\text{пр}}=kx$ — сила сжатия (растяжения) пружины; m — суммарная масса подвижной части генератора; k — коэффициент жесткости пружины; x — сжатие (растяжение) пружины.

В состоянии равновесия $x = x_0$.

$$F_{\text{поп}} = V_{\text{поп}} g = nG = nmg,$$
 (2)

где $V_{\rm non}$ — объем поплавка; n — коэффициент превышения подъемной силы поплавка над силой тяжести подвижной части генератора, n>1.

С учетом этого уравнение (1) принимает вид

$$nmg = mg + kx_0$$
.

Требуемый объем поплавка определим с учетом зависимости (2):

$$V = \frac{F_{non}}{g} = \frac{G + F_{np}}{g} = \frac{mg + \kappa x_o}{g},$$

где x_0 – (сжатие) растяжение пружины в равновесии подвижной части генератора.

Из уравнений (1) и (2) можно установить, что

$$x_0 = \frac{n-1}{k} mg = \frac{n-1}{\omega^2} g.$$
 (3)

Из уравнения (3) можно определить зависимость коэффициента n от параметров волногенератора:

$$n = \frac{mg + \kappa x_o}{mg} = 1 + \frac{\kappa x_o}{mg}.$$
 (4)

Угловая частота свободных колебаний индуктора на пружине без учета трения ω :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. (5)$$

Рассмотрим поведение системы в зависимости от положения поплавка и волны.

Уравнение морской волны

$$x_{\rm B} = A\sin(2\pi/T)t$$
,

где A — амплитуда волны; T — период колебаний волны.

При прохождении морской волны над поплавком с амплитудой $A \le a$ поплавок на нее не реагирует и генератор не работает. Для морской волны с амплитудой A >> a возможны два случая:

- 1. Над поплавком проходит гребень волны, в этом случае подвижная часть генератора сохраняет свое равновесное положение.
- 2. Над поплавком проходит «впадина» волны, в этом случае при

$$t \ge \frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{a+b}{A}$$

поплавок оказывается в воздухе и $F_{\mathrm{попл}} \! = \! 0$.

Подвижная часть приобретает потенциальную энергию по отношению к точке равновесия 0_1 , пружина при этом не растянута.

Эта энергия равна

$$W_{\text{II}} = mgx_0 + \frac{kx_0^2}{2} = x_0(mg + \frac{kx_0}{2}).$$

Подставим в это уравнение значение k из уравнения (4) и получим

$$W_{\Pi} = \frac{1}{2} mgx_0(n+1).$$

Под влиянием этой энергии подвижная часть генератора совершает колебательное движение на пружине.

Ели генератор не подключен к нагрузке, то подвижная часть генератора сместится по отношению к равновесному положению на величину, равную x_1 . В этом положении потенциальная энергия подвижной части генератора равна

$$W_{\rm II} = \frac{kx_1^2}{2} - mgx_1.$$

По закону сохранения энергии $W_{\pi 1}\!\!=\!\!W_{\pi}$. В этом случае

$$\frac{1}{2}mgx_0(n+1) = \frac{kx_1^2}{2} - mgx_1.$$
 (6)

Разделив полученное выражение на mg/2 и учитывая, что

$$\frac{k}{mg} = \frac{n-1}{x_0}$$

получим

$$x_0(n+1) = (n-1)\frac{x_1^2}{x_0} - 2x_1$$
.

Обозначив отношение $x_1/x_0 = k_0$, получим $(n+1) = (n-1)k_0^2 - 2k_0.$

Отсюда

$$n = \frac{k_0 + 1}{k_0 - 1}. (7)$$

Из формулы (7) следует, что коэффициент k_0 должен быть всегда больше 1, поскольку при k_0 =1 коэффициент n, указывающий во сколько раз подъемная сила поплавка больше силы тяжести подвижной части генератора, должен быть равен бесконечности, что физически невозможно.

Определим значение коэффициента k_{0} , исходя из размеров генератора, его активной части и угловой частоты свободных колебаний на пружине

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
.

Как следует из рис. 1, общая длина корпуса генератора $L_{\kappa} = l_a + 2(x_0 + x_1) + x_1$.

Принимая соотношение $l_{\rm a}$ = σ $L_{\rm k}$ и x_1 = k_0x и учитывая, что σ \approx 0,7 \div 0,9, получим

$$\frac{(1-\sigma)L_{\rm K}}{x_0} = 3k_0 = 2.$$

Подставим x_0 из (3) и получим

$$\frac{(1-\sigma)L_{\rm K}k}{g(n-1)m} = 3k_0 + 2.$$

Или

$$\frac{(1-\sigma)L_{\rm K}\omega^2}{g(n-1)} = 3k_0 + 2. \tag{8}$$

Подставляя n из (7) и обозначив

$$\frac{(1-\sigma)L_{\rm K}\omega^2}{2\varphi}=b,$$

уравнение (8) запишем в виде

$$b(k_0-1)=3k_0+2$$
,

отсюда получим выражение, необходимое для расчета коэффициента k_0 :

$$k_0 = \frac{b+2}{b-2}. (9)$$

Угловая частота колебания подвижной части генератора $\omega=2\pi f$, где f – частота индуктируемой ЭДС в обмотке якоря генератора. Если f=4÷8 Γ ц и, соответственно, $\omega=25\div50$ с $^{-1}$.

Рассмотрим пример:

$$σ=0.8; L_{\rm K}=2$$
 M; $f=5$ ΓII; $ω=31.4$ c⁻¹;
$$b = \frac{(1-σ)L_{\rm K}ω^2}{2g} = \frac{0.2 \cdot 2 \cdot 986}{2 \cdot 9.81} = 20.$$

$$k_0 = \frac{b+2}{b-2} = 1,3.$$
 $n = \frac{k_0+1}{k_0-1} = \frac{2,3}{0,3} = 7,7.$

$$L_{\rm k}(1-\sigma) = (3k_0 + 2)x_0; \ 2 \cdot 0, 2 = (3,9+2)x_0; \\ x_0 = 0, 4 \cdot 10^3/5, 9 = 67,8 \ {\rm mm}.$$

Максимальное перемещение подвижной части генератора

$$x_m = x_1 + x_0 = x_0(1 + k_0) = 67,8(1 + 1,3) = 156$$
 mm.

Отметим, что это перемещение подвижной части генератора определено при отсутствии нагрузки генератора. При нагрузке генератора величина перемещения, как будет показано ниже, будет меньше.

Рассмотрим движение подвижной части генератора при включении генератора на нагрузку.

Уравнение движения подвижной части генератора (поплавок в воздухе), отсчитываемое от уровня 0. В этом положении подвижной части генератора сжатие и скорость сжатия пружины равны нулю:

$$x_0 = \dot{x}_0 = 0.$$

$$m\ddot{x} = mg - k(x - x_0) - r\dot{x},$$

где r — коэффициент сопротивления движению со стороны работающего генератора.

Используя соотношение (4), получим

$$m\ddot{x} = nmg - kx - r\dot{x}$$
.

Разделив правую и левую часть уравнения на m, обозначив $r/m=2\beta$ и $k/m=\omega^2$ и учитывая начальные условия $x_0=\dot{x}_0=0$, получим

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega^2 x = ng.$$

Решая это уравнение с помощью преобразования Лапласа [5], получим

$$x(t) = \frac{ng}{\omega^2} \left[1 - e^{-\beta t} (\cos \omega_1 t + \frac{\beta}{\omega_1} \sin \omega_1 t) \right], \quad (10)$$

где $\omega^2_1 = \omega^2 - \beta^2$.

Выражение для скорости движения подвижной части генератора получим, продифференцировав (10):

$$\begin{split} \dot{x} &= \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{ng}{\omega^2} e^{-\beta t} \times \\ &\times \left[\beta (\cos \omega_1 t + \frac{\beta}{\omega_1} \sin \omega_1 t) + \omega_1 \sin \omega_1 t - \beta \cos \omega_1 t \right] = \\ &= \frac{ng}{\omega^2} e^{-\beta t} (1 + \frac{\beta^2}{\omega_1^2}) \omega_1 \sin \omega_1 t. \end{split}$$

Или, учитывая, что $\omega^2_{1} = \omega^2 - k_0 \beta^2$, получим $\dot{x} = \frac{ng}{\omega_1} e^{-\beta t} \sin \omega_1 t. \tag{11}$

Из (10) получим выражение для расчета величины перемещения подвижной части генератора с учетом того, что при $\omega_1 t_1$ = π \dot{x} =0:

$$x_m = \frac{ng}{\omega^2} \left(1 + e^{-\beta t_1} \right) = \frac{ng}{\omega^2} \left(1 + e^{-\frac{\beta \pi}{\omega_1}} \right).$$

Из (3) получим соотношение

Тогда
$$\omega^2=\frac{(n-1)g}{x_0}.$$

$$x_m=\frac{nx_0}{n-1}\left(1+e^{-\frac{\beta\pi}{\omega_1}}\right). \tag{12}$$

Оценим влияние тормозного момента, возникающего в генераторе при подключении нагрузки к генератору.

Обозначим через $P_{\rm cp}$ среднее значение мощности, передаваемой генератором нагрузке.

Мгновенная мощность, необходимая для перемещения подвижной части генератора $P=r\dot{x}\dot{x}=2m\beta\dot{x}^2$, а средняя мощность для перемещения

$$\overline{P} = 2m\beta \overline{\dot{x}}^2$$
.

Для расчета средней мощности необходимо определить значение средней скорости перемещения подвижной части манипулятора \bar{x} . Определим величину \bar{x}^2 , воспользовавшись [6] и выражением $_{(11)}$.

$$\begin{split} \overline{\dot{x}}^2 &= \frac{1}{t_1} \int\limits_0^{t_1} \dot{x}^2 \mathrm{d}t = \\ &= \frac{\omega_1}{\pi} \left(\frac{ng}{\omega_1} \right)^2 e^{-2\beta t} \sin^2 \omega_1 t \mathrm{d}\omega t = \frac{n^2 g^2}{\pi \omega_1} \times \\ &\times \left[\frac{e^{-2\beta t} \sin \omega_1 t \left(2\beta \sin \omega_1 t - 2\omega_1 \cos \omega_1 t \right)}{4\omega_1^2 + 4\beta^2} + \frac{e^{-2\beta t} 2\omega_1^2}{(4\omega_1^2 + 4\beta^2)(-2\beta)} \right] = \\ &= \frac{n^2 g^2}{\pi \omega_1} \frac{\omega_1^2}{4\beta(\omega_1^2 + \beta^2)} \left[1 - e^{-2\beta \frac{\pi}{\omega_1}} \right] \approx \\ &\approx \frac{n^2 g^2 \omega_1}{4\pi \beta \omega^2} 2\beta \frac{\pi}{\omega_1} = \frac{n^2 g^2}{2\omega^2}. \end{split}$$

Тогда

$$\overline{P} = m\beta \frac{n^2g^2}{\omega^2} = \frac{p_{\rm cp}}{n}$$

где η — коэффициент полезного действия генератора.

Отсюда

$$\beta = \frac{P_{\rm cp}\omega^2}{\eta m n^2 g^2}.$$
 (13)

Или, используя формулу (3), получим

$$\beta = \frac{P_{\rm cp}(n-1)}{\eta m n^2 g x_0}.$$
 (14)

Для приведенного выше примера, принимая m=20 кг; η =0,2; $P_{\rm cp}$ =100 Вт; n=7,7 x_0 =68 мм, получим

$$\beta = \frac{100 \cdot 6.7}{0.2 \cdot 20 \cdot 59.3 \cdot 9.8 \cdot 6.8 \cdot 10^{-2}} = 4.2 \text{ c}^{-1}.$$

Параметр β показывает, на сколько снижается частота собственных колебаний подвижной части генератора при подключении к генератору нагрузки, мощность которой равна 100 Вт.

Значит, частота собственных колебаний подвижной части генератора при подключении нагрузки уменьшится и станет равной

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \beta^2} = \sqrt{31,4^2 - 4,2^2} = 31,2 \text{ c}^{-1}.$$

Можно определить требуемую жесткость пружины:

$$k = m\omega^2 = 20.9,86.10^2 = 1,97.10^4 \frac{\text{H}}{\text{M}}$$

Требуемую жесткость пружины можно определить и по формуле (5):

$$k = \frac{(n-1)mg}{x_0} = \frac{6.7 \cdot 20 \cdot 9.8}{6.8 \cdot 10^{-2}} = 1.97 \cdot 10^4 \frac{\text{H}}{\text{M}}.$$

Равенство значений коэффициента k, полученных по разным расчетным соотношениям, подтверждает полученный выше результат.

Оценим по (12) величину перемещения подвижной части генератора при подключении нагрузки к генератору.

$$x_m = \frac{nx_0}{n-1} \left(1 + e^{-\frac{\beta\pi}{\omega_1}} \right) = \frac{7.7}{6.7} 67.8 \left(1 + e^{-\frac{4.2\pi}{31.4}} \right) = 129 \text{ mm.}$$

Сравнивая полученное значение величины перемещения подвижной части генератора при подключении нагрузки к генератору со значением, определенном выше при работе генератора без нагрузки, видно, что уменьшение перемещения составляет 27 мм, или 17,3%.

Приведенный пример показывает, что подключение к генератору нагрузки мощностью 100 Вт приводит к заметному затуханию колебаний подвижной части генератора. Через 4–5 колебаний генератор практически перестает вырабатывать и передавать нагрузке энергию.

Расчет электрической подсистемы генератора. На рис. З приведена структура магнитной цепи статора при выполнении индуктора с постоянными магнитами.

Функции магнитопровода возложены на корпус генератора. Обмотка статора выполнена в виде тороидальных катушек и размещена в пазах магнитопровода статора. Магниты имеют тороидальную форму с внутренним отверстием. На рис. З магниты заштрихованы. Между магнитами установлены ферромагнитные вставки, имеющие также тороидальную форму и внутреннее

отверстие, диаметр которого равен диаметру отверстия магнита.

При перемещении ротора на 2τ магнитный поток, охватывающий тороидальную обмотку, изменяется от $-\Phi_m$ до $+\Phi_m$ и 4π .

Приведем расчетные формулы для определения потоков, сцепляющихся с тороидальной обмоткой статора.

Здесь: F_m^{\flat} и R_m^{\flat} — приведенные значения магнитодвижущей силы и магнитного сопротивления магнита

$$F_m^{/} = rac{h_m H_c}{k_{
m G}}; \qquad R_m^{/} = rac{h_m H_c}{S_m B_r k_{
m G}},$$

где k_{σ} — коэффициент рассеяния магнита, учитывающий наличие потоков рассеяния;

учитывающий наличие потоков рассеяния,
$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \pi D \frac{\tau}{2}} - \text{магнитное сопротивление воздуш-}$$

ного зазора; h_m — толщина магнитного кольца; B_r — остаточная индукция постоянного магнита.

Составим уравнение МДС для одного замкнутого контура:

$$F_m^{/} = (4R_\delta + R_m^{/} + R_j)\Phi_m.$$
 (15)

Из (15) получим уравнение для расчета потока:

$$\Phi_{m} = \frac{F_{m}^{/}}{R_{m}^{/} + 4R_{\delta} + R_{j}} = \frac{s_{m}B_{z}}{1 + k_{\delta} \frac{4R_{\delta} + R_{j}}{R_{m}^{/}}}.$$
 (16)

Значение коэффициента k_δ определяется по методике, приведенной в [7]:

$$\begin{split} k_{\delta} &= 1 + \frac{\lambda_{\text{GM}}}{\lambda_{m}}; \quad \lambda_{\text{GM}} = \lambda_{\text{G1}} + \lambda_{\text{G2}}; \\ \lambda_{m} &= \frac{s_{m}B_{z}}{1 + k_{\delta}\frac{4R_{\delta} + R_{j}}{R_{m}}} = \mu_{0}\mu_{\text{M}}\frac{s_{m}}{h_{m}}; \\ \lambda_{\text{G1}} &= \mu_{0}D \int_{0}^{h_{m}/2} \frac{\mathrm{d}x}{h_{m} + 2x} = \mu_{0}D\ln 2 = 0,347\mu_{0}D; \\ \lambda_{\text{G2}} &= \mu_{0}\frac{D}{3}\int_{0}^{h_{m}} \frac{\mathrm{d}x}{h_{m} + 2x} = \frac{\mu_{0}D}{6}\ln 3 = 0,183\mu_{0}D; \\ \lambda_{m} &= \mu_{m}\mu_{0}\frac{s_{m}}{h_{m}} = \mu_{m}\mu_{0}\frac{\frac{\pi}{4}\left(D^{2} - \frac{D^{2}}{4}\right)}{\frac{\tau}{3}} = \\ &= \mu_{m}\mu_{0}\frac{\pi}{4}\frac{\frac{8}{9}D^{2}}{\frac{\tau}{1}} = \mu_{m}\mu_{0}\frac{2\pi D}{3\tau}, \end{split}$$

где $\lambda_{\delta 1}$, $\lambda_{\delta 2}$ — коэффициенты проводимости путей рассеяния снаружи и внутри кольца магнита со-

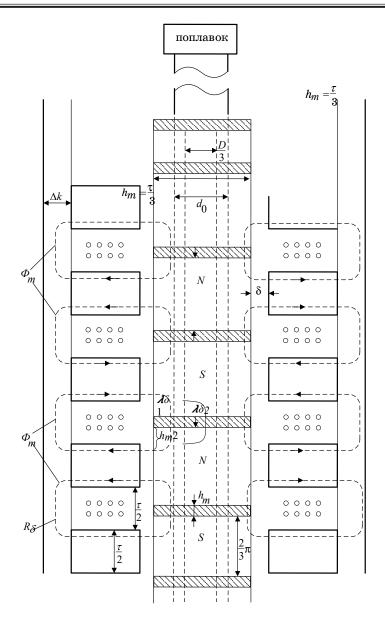


Рис. 3. Структура магнитной цепи активной зоны волногенератора

ответственно; $\lambda_{\delta m}$ — сумма коэффициентов проводимости воздушных участков пути рассеяния магнитного потока; λ_m — коэффициенты проводимости участка пути рассеяния магнитного потока внутри сердечника магнита; μ_m — магнитная проницаемость материала магнита.

Тогда

$$k_{\delta} = 1 + \frac{0.53}{\mu_m \frac{2D}{3\tau} \pi} = 1 + \frac{0.237}{\frac{D}{\tau}}.$$

Полюсное деление активной зоны рассчитываем по формуле

$$\tau = \frac{g}{\pi \omega f_{\rm ep}} \left(1 - \frac{\beta \pi}{2\omega} \right),$$

где частота $f_{\rm cp}{\approx}6-10\Gamma$ ц является тем допустимым значением частоты, при которой можно не учитывать поверхностный эффект. Эту частоту можно определить из выражения

$$\Delta_{\text{HOB}} \approx \frac{20}{\sqrt{f_{\text{CD}}}} = \frac{\Delta_{\text{K}}}{2},$$

 $\Delta_{\rm nob}$ — глубина проникновения переменного магнитного потока в сплошной магнитопровод; $\Delta_{\rm K}$ — ширина сплошного магнитопровода — толщина корпуса волногенератора.

Площадь сечения тороидальной обмотки статора

$$s_{_{
m K}}=rac{ au}{4}(D_{_{
m K}}-2\Delta_{_{
m K}}-D).$$

Приведенные расчетные соотношения позволяют выполнить расчет волногенератора поплавкового типа.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Установлены расчетные зависимости основных параметров волногенератора от мощности генератора.

- 2. Показано влияние нагрузки генератора на частоту и амплитуду колебаний подвижной части генератора и частоту ЭДС генератора.
- 3. Разработанные математические модели механической и электрической подсистем волногенератора поплавкового типа с электромагнитной редукцией позволяют выполнить расчет генераторов подобного типа и оценить возможность их практической реализации.

Библиографический список

- 1. $\Gamma a \partial жиев$ Я. М., $\Gamma a \partial жиев$ М. А. Преобразователь энергии морских волн // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 4. С. 39–41.
- 2. Ivanova I. A., Agren O., Bernhoff H., Leijon M. Simulation of wave energy converter

- with octagonal linear generator // IEEE Journal of Oceanic Engineering. July 2005. Vol. 30. Iss. 3. Pp. 619-629.
- 3. Патент РФ № 93043446 Поплавковая волновая электростанция / А. А. Темеев. Кл. F03B13/16. 1996.09.20.
- 4. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов. М.: Наука. 1968.
- 5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970.720 с.
- 6. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, рядов и произведений / под ред. А. Джефри, Д. Цвиллингера. 7-е изд.: пер с англ., под ред. В. В. Максимова. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 1232 с.
- 7. Вольдек А. И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.001.63-52(075.8)

В. А. Павлюков*

кандидат технических наук, доцент

С. Н. Ткаченко*

кандидат технических наук, доцент

А. В. Коваленко*

ассистент

*ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

РАЗРАБОТКА САПР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ ДЛЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Работа посвящена вопросам разработки учебной САПР и ее внедрения в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров электроэнергетического профиля. Платформой для создания САПР была принята проектирующая система графического редактора AutoCAD, использующая его объектную модель и внутренние алгоритмические языки программирования AutoLisp, VisualLisp, а также язык создания диалоговых окон DCL. Информационное обеспечение САПР создано с использованием электронных таблиц Excel.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, учебный процесс, электрическая часть электростанций и подстанций, информационное обеспечение, алгоритмические языки.

V. A. Pavlukov*

PhD, Tech., Associate Professor

S. N. Tkachenko*

PhD, Tech., Associate Professor

A. V. Kovalenko*

Assistant

*Donetsk National Technical University

CAD-SYSTEM OF POWER PLANTS AND SUBSTATIONS ELECTRICAL PART IN EDUCATION PROCESS

The work is dedicated to the development of training computer-aided design system and its implementation in the educational process of electricity profile bachelors and masters preparation. Platform to create a CAD system was adopted projecting graphic AutoCAD software using its object model internal algorithmic programming languages AutoLisp, VisualLISP, as well as creating a DSL language dialogs. Information support of CAD system created using Excel spreadsheets.

Keywords: computer-aided design system, the educational process, part of the electric power stations and substations, object models, algorithmic languages.

В последнее время различные САВпрограммы буквально заполонили отечественный и зарубежный рынок. Неудивительно, что система автоматизированного проектирования (САПР) не обошла такую обширную отрасль, как энергетика. Основными направлениями, в которые активно внедряют систему автоматизации проектных работ [1], является промышленная электроника (построение схем, программы для формирования печатных плат), электроснабжение (проектирование внутреннего электрического освещения и силового электроснабжения жилых, общественных и производственных сооружений), электротехника (проектирование ОРУ, ЭС, АСУТП, построение принципиальных электрических схем) и т. д.

Сегодня многие программы САПР внедрены в производство отрасли электроэнергетики, на-

пример известные всем программы $AutoCAD^{\circledast}$ Electrical, CAD $Electro^{\circledast}$, $MOДУС^{\circledast}$, $KOM\PiAC-Электрик^{\$}$, Project Studio CS $Электрика^{\$}$, nanoCAD $Электро^{\$}$ и др. Но они являются сложными программными продуктами. Они предназначены для специалистов высокой квалификации и требуют немалых денежных средств на приобретение. Говоря об учебном процессе, стоит отметить, что технические вузы уже не могут игнорировать острую необходимость в подготовке кадров, которые готовы и умеют работать в среде системы автоматизированного проектирования. Для формирования специалиста нужно гибкое, не громоздкое Π O, при помощи которого можно пошагово обучать студента.

Исследование путей создания и реализации САПР электрической части станций и подстанций и использование его в учебных целях.

За базовую платформу разработчиками была взята стандартная проектирующая система $AutoCAD^{\mathbb{R}}$ компании $Autodesk^{\mathbb{R}}$, так же как и другими разработчиками (например, «ProjectStudio CS Электрика» — $CSoft^{\mathbb{R}}$; WinELSO $^{\mathbb{R}}$ — Русская промышленная компания; «MagiCAD Электроснабжение» — Лира сервис; «HTE» — Компания ПОИНТ). Также выбор такой платформы обусловлен тем, что графический пакет имеет собственный внутренний алгоритми-

- Вставка элементов схемы
- Документирование исходных данных
- Сборка схемы
- Убрать разметку узлов
- Расчет КЗ в 1 точке
- Расчет КЗ в N точкех с документированием
- Выбор выключателя

Рис. 1. Пример экранного контекстного меню

ческий язык программирования AutoLisp, а также язык создания диалоговых окон DCL.

Учебная САПР (УСАПР) получила условное название CAD Electric Education. Она включает в себя две подсистемы. Они имеют единое информационное обеспечение в виде библиотеки графических блоков (БГБ) и символьных баз данных (СБД), а также общие фрагменты программного обеспечения. Подсистема проектирования электрических схем первичных соединений включает в себя проектные процедуры для расчета: распределения мощностей в схемах выдачи мощности тепловых (ТЭС) и ветровых электрических станций (ВЭС); токов короткого замыкания (ТКЗ) и выбора основного силового оборудования; пусков и самозапусков двигателей. Вторая подсистема реализует проектную процедуру трассировки кабелей.

Взаимодействие пользователя построено на двух основных компонентах AutoCAD: системе прикладных экранных контекстных меню и экранных диалоговых окнах. Первые из них предназначены для вызова функций, реализующих отдельные проектные процедуры. На рис. 1 приведен пример главного меню проектной процедуры расчета токов КЗ.

Общая структура подсистемы проектирования первичных схем и ее файловой системы приведена на рис. 2. Рассматриваемая подсистема CAD_Electric_Education включает в себя четыре подсистемы:

KZ &Select – расчет КЗ и выбор основного силового оборудования;

flow distribution – расчет потокораспределения в схемах выдачи мощности ТЭС и ВЭС;

SZ – оценка самозапуска двигателей при проектировании систем с. н. электростанций;

Kbl_trase – трассировки силовых и контрольных кабелей на высоковольтных подстанциях.

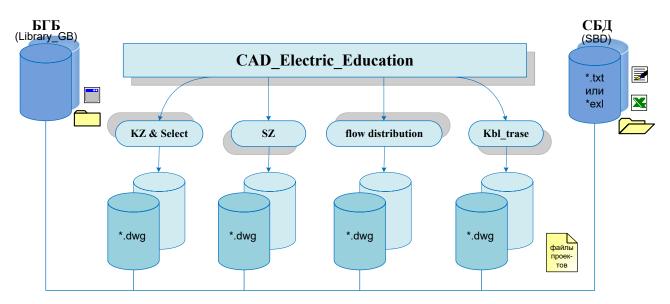


Рис.2. Общая структурная схема подсистемы УСАПР

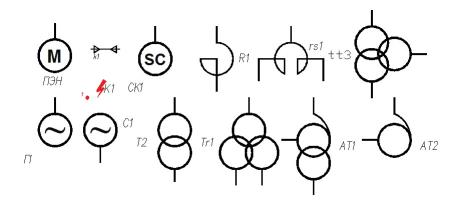


Рис. 3. Графические блоки УСАПР

Обязательным элементом САПР является ее информационное обеспечение: SBD на рис. 2 — символьная его составляющая, а Library_GB (дословно «Библиотека графических блоков») представляет собой графическую составляющую. Для каждого элемента электрических схем в графическом редакторе AutoCAD создан его графический образ в виде блока с атрибутами (рис. 3).

Рассматриваемая учебная САПР предусматривает использование символьной исходной информации, которая может быть помещена в плоские таблицы. Наиболее удобным инструментом для их обработки являются электронные таблицы (ЭТ). Отдельные разделы СБД размещаются на отдельных именованных листах книги ЭТ МС Excel. СБД имеет открытую структуру, администрируется студентами под руководством преподавателя. Она включает в себя современное силовое оборудование отечественных производителей, а также таких мировых лидеров в области электротехники, таких компаний, как: $ABB^{(8)}$, Siemens[®], Schneider Electric[®], General Electric[®], $AlstomGrid^{ ext{ iny R}},\; Legrand^{ ext{ iny R}},\; «Таврида электрик» и$ др.

Математическое обеспечение системы. Подсистемы расчета токов КЗ, режимов самозапуска АД и потокораспределения предусматривают работу с многоузловыми схемами произвольной конфигурации. Для их расчета применен метод узловых напряжений в векторно-матричной форме записи его основных уравнений. Решение систем алгебраических уравнений как в линейном, так и в нелинейном вариантах осуществляется методом квадратных корней в варианте работы с разреженными матрицами и векторами, предложенном в [3]. Этот метод также использует свойство симметричности матрицы коэффициентов, чем обеспечивается значительное сокращение объема вычислений.

Основной задачей всех подсистем УСАПР является преобразование созданной пользователем на экране монитора расчетной схемы в математическую модель в виде направленного графа схемы. Ветви графа идентифицируются по изо-

браженным на схеме элементам (системам, генераторам, трансформаторам и др.). Узлы графа формируются программно на основании данных, изображенных на экране монитора секций ОРУ, линий связи, а также точек вставки графических блоков элементов схемы и их портов.

В проектной процедуре трассировки кабелей требуется нахождение трассы кабеля, имеющей минимальную длину по сравнению с другими альтернативными вариантами его прокладки. Для этих целей формируется матрица расстояний участков трасс между их узлами. Нахождение минимальной длины трассы определяется по алгоритму Дейкстры [4].

Программное обеспечение УСАПР. Прикладное ПО описываемой системы создано с использованием внутренних алгоритмических языков программирования Lisp, VisualLisp и языка DCL (Dialog Control Language для работы с диалоговыми окнами) графического редактора AutoCAD [5].

При разработке прикладного ПО были использованы все, описанные в [6], стили программирования: «инженерный», «программистский» и в наибольшей степени «объектный». Последний стиль основан на применении объектной модели AutoCAD. Объекты в нем рассматриваются как иерархия, содержащая не только графические примитивы, но и неграфические элементы (словари, таблицы и др.). Учебной программой дисциплины «САПР электрической части электростанций» предусматривается изучение студентами отдельных приемов программирования в среде AutoCAD.

Подсистема расчета ТКЗ, выбора оборудования и токопроводов. Алгоритмы, лежащие в основе расчетов токов КЗ, подробно изложены в [7]. Расчетная схема формируется студентом на экране монитора, как это показано на рис. 4. Затем по ней программно формируются узлы схемы. Индикация номеров узлов на схеме позволяет студенту оценить правильность сформированной им схемы (номера узлов фрагментов схемы одного потенциала должны быть одинаковыми, как это видно из рис. 4).

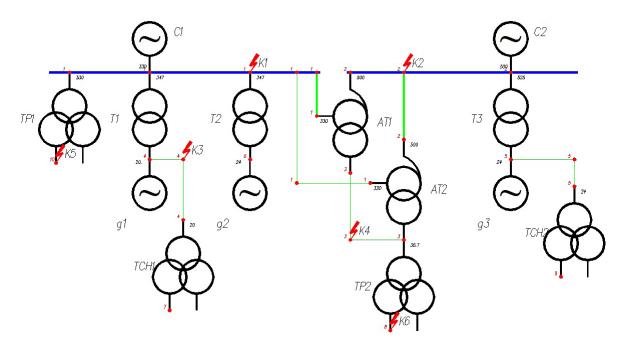


Рис. 4. Пример созданной на экране монитора расчетной схемы

После этого студент проводит в интерактивном режиме предварительные расчеты токов КЗ в отдельных узлах расчетной схемы. Индикация расчетных данных в данном случае выполняется в диалоговом окне (рис. 5). В нем приводятся все составляющие суммарного тока КЗ в узле, а также его тепловой импульс. В случае КЗ на выводах генератора в диалоговом окне приводятся также составляющие тока КЗ ближнего источника.

Для получения сводной таблицы токов КЗ студент должен предварительно выполнить установку точек КЗ в требуемых ему узлах расчетной схемы (см. рис. 4) с указанием названия точки и ее параметров (времен отключения КЗ). После выбора пункта меню «Расчет КЗ в N точках с документированием» (см. рис. 1) программа выполняет расчет токов КЗ во всех указанных на расчетной схеме точках и формирует сводную таблицу расчета КЗ (рис. 6).

В целях эффективной проверки расчетных схем выполняется документирование исходных данных ее элементов. Примеры таких документов приведены на рис. 7.

К особенностям алгоритма расчета токов КЗ следует отнести программное определение величин постоянных времени затухания апериодических составляющих токов КЗ (*Ta*), используемых при расчете ударного тока КЗ, его апериодической составляющей и теплового импульса тока КЗ. Для этого сопротивления всех элементов расчетной схемы, а также все режимные параметры представляются в комплексном виде.

Полученные расчетные значения составляющих токов КЗ заносятся на хранение во внутреннюю библиотеку AutoCAD с именем KZ. В дальнейшем они используются в процедурах выбора оборудования и токопроводов. На данный момент в УСАПР реализованы проектные процедуры выбора выключателей, разъединителей и трансформаторов тока наружной установки.

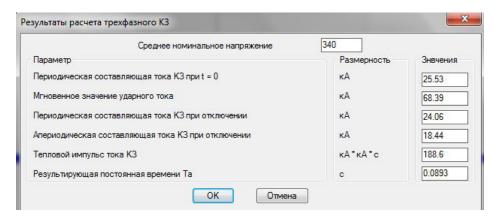


Рис. 5. Индикация результатов расчета токов КЗ в диалоговом окне

	Сводная таблица расчетов токов КЗ							
Nº ĸз	Обозначение точки КЗ	<i>Ибаз,кВ</i>	Іпо,кА	Іпt,кА	iat,κA	іуд,кА	Вк,кА*кА*с	Та,с
K1	OPY-330	340	25.5	24.1	18.4	68.4	188.6	0.089
К2	OРУ-500	550	16	15.2	10.6	42.6	71.4	0.079
КЗ	на выводах Г1	20	139.6	128.3	148.1	385.5	81972.6	0.209
	от генератора		56.2	45	69.2	157.3	14018.7	0.432
K4	AT HH	37	24.8	24.8	33	69.8	740.5	1.005
К5	PTCH1	6.3	18.4	76	6.3	46.6	82.1	0.042
К6	PTCH2	6.3	21.7	75.1	12.1	56.9	124.4	0.065

Рис. 6. Пример выходного документа при расчете токов КЗ

Исходные данные систем						
Обозначение	Skmax,MBA	R,o.e.	X,o.e.	Skmin,MBA	E,o.e.	
C2	7000	0.01	0.14	7000	1.05	
C1	5000	0.01	0.2	5000	1.05	

Рис. 7. Пример документирования исходных данных элемента расчетной схемы

Подсистема расчета пусков и самозапусков асинхронных электродвигателей. Пример созданной на экране монитора расчетной схемы показан на рис. 8. В ней преобладают высоковольтные асинхронные двигатели (АД).

В системах с. н. тепловых и атомных электростанций для улучшения пусковых характеристик АД в их роторных обмотках применяются глубокие или фигурные пазы. Последнее приводит к усложнению математических моделей АД из-за нелинейности сопротивлений цепи ротора.

Несмотря на большое количество предложенных для моделирования глубокопазных АД методик в них либо игнорируются промежуточные точки пусковых характеристик, как, например в [10], либо не обеспечивается достаточное совпадение исходных и расчетных данных в этих точках. Как правило, рассчитанные по известным методикам пусковые характеристики дают хо-

рошую сходимость только в крайних зонах диапазона скольжений, и это аргументируется авторами отсутствием исходных данных в промежуточных точках скольжения.

В УСАПР для моделирования глубокопазных АД применена общепринятая одноконтурная эквивалентная схема замещения (ЭСЗ) (рис. 9) [9].

Все расчетные величины определяются в о. е., приведенных к номинальным данным АД. Параметры статора не зависят от частоты вращения ротора АД. Активное сопротивление статора принимаем равным номинальному скольжению, а индуктивное рассчитывается по (1).

$$X_{\sigma S} = \frac{1}{2 \cdot K_i},\tag{1}$$

где K_i – кратность пускового тока статора.

В описываемой методике нелинейные зависимости сопротивлений цепи ротора ЭСЗ описы-

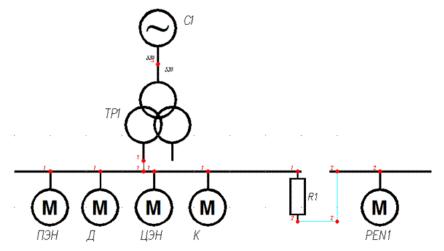


Рис. 8. Пример расчетной схемы для расчета режимов самозапуска АД

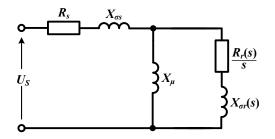


Рис. 9. Одноконтурная Т-образная эквивалентная схема замещения глубокопазного АД

ваются с помощью двух эквивалентных прямоугольных пазов: отдельно для активной и отдельно для индуктивной составляющих сопротивления цепи ротора. При этом составляющие сопротивления ротора во всем диапазоне изменения частот вращения можно выразить следующими известными соотношениями:

$$R_{r}(S) = R_{2b} + K_{R}(S) \times R_{2c},$$

$$X_{\sigma r}(S) = X_{2b} + K_{X}(S) \times X_{2c},$$
(2)

где $R_{2b},~X_{2b}$ — приведенные сопротивления частей обмотки ротора, расположенных в воздухе; R_{2c} и X_{2c} — приведенные сопротивления частей обмотки ротора, расположенных в пазах при скольжении $S\approx 0;~K_R,~K_X$ — коэффициенты, учитывающие изменение роторных сопротивлений из-за вытеснения тока при скольжении S по сравнению с их значениями при $S\approx 0$.

Функции для расчета нелинейных зависимостей активных и индуктивных составляющих сопротивлений ротора применительно к прямоугольным пазам ротора представлены соответственно на рис. 10 и 11.

Определение параметров цепи ротора ЭСЗ осуществляется путем минимизации отклонений исходных и расчетных значений токов статора и вращающего момента как в крайних, так и в промежуточных точках скольжения [2]. Минимизация указанных отклонений производится

$$R_{2}(s,Rrn,ar,hr) := \begin{cases} \xi \leftarrow 0.9 \cdot hr \cdot \sqrt{|s|} \\ Kr \leftarrow \xi \cdot \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{(\cosh(2\xi) - \cos(2\xi))} \end{cases}$$

$$Rrn[ar + (1 - ar) \cdot Kr]$$

Рис. 10. Функция для расчета активного сопротивления ротора

$$X_2(s, Xrn, ax, hx) := \begin{cases} \xi \leftarrow 0.9 \cdot hx \cdot \sqrt{|s|} \\ Kx \leftarrow \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{(\cosh(2\xi) - \cos(2\xi))} \\ Xrn \cdot [ax + (1 - ax) \cdot Kx] \end{cases}$$

Рис. 11. Функция для расчета индуктивного сопротивления ротора

путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), состоящей из 7 уравнений (В случае использования данных в одной промежуточной точке скольжения). В результате решения СНАУ определяются 7 параметров ЭСЗ: сопротивление цепи намагничивания (X_{μ}), высоты эквивалентных пазов ротора (hr, hx), сопротивления ротора при номинальном скольжении (Rrn, Rrx) и внепазовые части обмоток ротора (аr, ах). Шесть из этих параметров являются входными параметрами приведенных выше на рис. 10 и 11 функций.

Значения тока статора и вращающего момента в промежуточных точках для большинства АД в описываемой методике брались по данным, приведенным в [8]. В качестве примера на рис. 12 и 13 приведены расчетные пусковые характеристики АД привода питательного насоса энергоблока мощностью 300 МВт. Исходные данные вращающего момента и тока статора для промежуточной точки скольжения s=0,6 были взяты из [8].

Как видно из рисунков, имеет место хорошая сходимость исходных данных (обозначены точками) с результатами расчета во всех исходных точках скольжения.

В отличие от остальных элементов расчетных схем, параметры которых заносятся на хранение в атрибуты $\Gamma Б$ этих элементов, каждый A Д имеет кроме паспортных данных еще и 9 расчетных

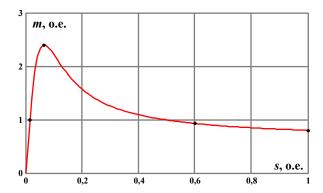


Рис. 12. Расчетная зависимость тока статора от скольжения АД привода ПЭН

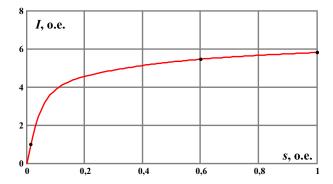


Рис. 13. Расчетная зависимость вращающего момента от скольжения АД привода ПЭН

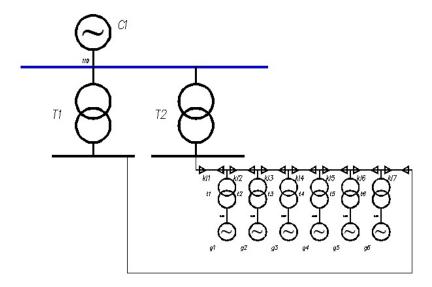


Рис. 14. Пример формирования расчетной схемы ВЭС на экране монитора

параметров их одноконтурных ЭСЗ. Для хранения столь объемной информации для всех АД на рисунке была использована внутренняя библиотека AutoCAD с именем AD.

Подсистема расчета потокораспределений в схемах выдачи мощности ТЭС и ВЭС. Расчетная схема должна содержать как минимум одну систему, представляющую источник большой мощности (рис. 14). Через ее ветвь происходит переток небаланса мощности, полученный в расчетной схеме.

Основные функции для этой подсистемы аналогичны тем, что были изложены выше для подсистемы расчета токов КЗ. Уникальным по сравнению с описанным выше меню (см. рис. 1) является основной пункт меню «Расчет потокораспределения». После окончания расчета на участках кабельных трасс, соединяющих отдельные ветрогенераторы, зеленым цветом индицируются величины протекающих по ним активных мощностей (рис. 15).

Подсистема трассировки кабелей в РУ. Процедура кабельной трассировки является одной из основных при проектировании электрической части электростанций и подстанций. Учитывая трудоемкость ее выполнения, были созданы как отдельные программы, так и подсистемы САПР. Наиболее известными среди последних являются САПР кабельного хозяйства (например, $ElectriCS\ 3D$ — теплоэлектропроект г. Москва и др.).

В этих системах для формирования кабельных трасс применяется оцифровка бумажных или электронных документов планов зданий или территорий открытых распределительных устройств (ОРУ), что является весьма трудоемкой процедурой. Результаты оцифровки заносятся в специально создаваемые журналы кабелей, трасс, зданий и др. В УСАПР применен альтернативный вариант программной оцифровки кабельных трасс, создаваемых в среде графического редактора AutoCAD. Прямолинейные участки кабельных трасс создаются с помощью динамических графических блоков, имеющих переменную длину и ширину.

Вначале программно обрабатываются все участки кабельных трасс рисунка, и на основе этой информации строится граф их взаимосвязей. К листьям графа присоединяется информация о панелях и распределительных коробках,

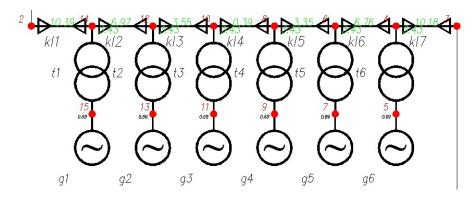


Рис. 15. Фрагмент расчетной схемы ВЭС с результатами распределения мощностей

с которыми связаны жилы прокладываемых кабелей.

На рис. 16 приведена общая структурная схема обработки данных кабелей в проектной процедуре трассировки кабелей. В центральной части рисунка показан обрабатываемый файл рисунка плана подстанции. Справа от него — внешнее информационное обеспечение по трассируемым кабелям в виде их кабельных журналов (КЖ). Последние могут быть созданы либо в результате выполнения проектных процедур распределения жил по кабелям, либо сформированы пользователем в Excel.

В рассматриваемой проектной процедуре также широко используются внутренние библиотеки рисунка для хранения как исходных данных кабелей, так и результатов их трассировки на плане подстанции. Как видно из рисунка, вначале данные КЖ перегружаются в исходную библиотеку с именем obk. Затем пользователь из общего объема кабелей выделяет взаимнорезервируемые кабели, имеющие иной алгоритм трассировки. Данные взаимнорезервируемых кабелей помещаются на хранение в библиотеку с именем kvr.

Как известно, взаимнорезервируемые кабели полностью или частично должны быть проложены по различным трассам. Алгоритмом проектной процедуры предусмотрена прокладка первого кабеля автоматически, а второго — автоматизированно в интерактивном режиме с указанием пользователем участков трасс, по которым должен пройти этот кабель.

После процедуры трассировки обычных и взаимнорезервируемых кабелей данные участков кабельных трасс, по которым были проложены кабели, заносятся на хранение в библиотеку с именем trs. Данные этой библиотеки затем ис-

пользуются при интерактивном просмотре трасс кабелей, а также при создании выходных документов трассировки кабелей.

В 2016/2017 учебном году УСАПР была внедрена в учебный процесс на электротехническом факультете ДонНТУ при выполнении курсовых проектов и бакалаврских работ. Она показала свою эффективность при изучении студентами вопросов автоматизации проектных процедур в электроэнергетике.

Можно сделать следующие выводы.

- 1. В основу учебной САПР (как и в лучших промышленных аналогах) был положен стандартный пакет автоматизации AutoCAD® компании Autodesk лидера в области проектирования, дизайна и графики. При разработке САПР были использованы: объектная модель редактора и его внутренние алгоритмические языки программирования AutoLisp и VisualLisp, а также язык создания диалоговых окон DCL.
- 2. Информационное обеспечение создано в среде электронной таблицы Microsoft® Excel. В символьной БД накоплена обширная информация об оборудовании ведущих фирм мира. Разработана также библиотека графических блоков основных элементов электрических схем.
- 3. Математическое обеспечение УСАПР включает методы решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений методом квадратных корней, использующим свойство симметричности матриц коэффициентов. Применен вариант метода для работы с разреженными матрицами коэффициентов, что обуславливает высокое быстродействие расчетных функций.
- 4. К достоинствам УСАПР следует отнести использование в качестве выходных документов исходных расчетных схем, формируемых сту-



Рис. 16. Схема обработки информации в процедуре трассировки кабелей

дентами на экране монитора, а также документирование исходных данных элементов схем и результатов расчета стационарных и переходных режимов работы схем.

- 5. УСАПР наряду с традиционными ЭС позволяет автоматизировать проектирование схем выдачи мощности современных ВЭС.
- 6. Подсистема расчета режима пуска и самозапуска электродвигателей системы собственных нужд ТЭС позволяет выполнять расчеты этих режимов для многоузловых схем, что дает возможность учитывать предвключенную на-
- грузку резервных трансформаторов, а также анализировать указанные режимы в схемах, содержащих фрагменты различных классов напряжения.
- 7. Подсистема САПР трассировки кабелей на открытых распределительных устройствах высоковольтных подстанций в отличие от известных аналогов выполняет ее по сформированным пользователем на плане подстанции кабельным трассам в среде редактора AutoCAD. Для определения трассы кабеля минимальной длины применен метод Дейкстры.

Библиографический список

- 1. *Мыльников А*. Как я выбрал САПР // САПРжурнал: статьи, уроки и материалы для специалистов области САПР. 2014. URL: http://saprjournal.ru/stati/kak-ya-vybiral-sapr/.
- 2. Павлюков В. А., Ткаченко С. Н., Коваленко А. В. Учебная САПР электрической части станций и подстанций: учеб. пособие. Харьков: ФЛП Панов А. Н., 2016. 124 с.
- 3. Переходные процессы в системах электроснабжения: учеб. / В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк, Л. И. Несен и др.; под ред. В. Н. Винославского. К.: Выщашк. Головное изд-во, 1989. 422 с.
- 4. Алгоритм Дейкстры: материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: https:// ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Дейкстры.
- 5. Полещук Н. Н. AutoCAD-разработка приложений, настройка и адаптация. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 992 с.

- 6. Зуев С. А., Полещук Н. Н. САПР на базе AutoCAD как это делается. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 1168 с.
- 7. Короткие замыкания и выбор оборудования: учеб. пособие для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев и др.; под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старщинова. М.: МЭИ, 2012. 568 с.
- 8. Черновец А. К., Шаргин Ю. М. Обоснование технических решений по схемам электроснабжения атомных электростанций: учеб. пособие. Л.: ЛПИ им. М. И. Калинина, 1985. 60 с.
- 9. ГОСТ 7217-87. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Издательство стандартов, 2003. 38 с.
- 10. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38–42.

УДК 621.313(07)+621.38(07)

Ю. И. Сепп*

кандидат технических наук, доцент

Н. И. Федоров*

студент

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМАХ С ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В статье приводятся уравнения для расчета значений потоков колебательной энергии и их спектральных распределений, возникающих при электродинамических взаимодействиях элементов систем, содержащих токопроводящие элементы.

Ключевые слова: токопровода, электродинамические взаимодействия, вибрация, виброактивность источников, потоки колебательной энергии, электромеханическая совместимость.

Yu. I. Sepp*

PhD, Tech., Associate Professor

N. I. Fedorov*

Student

*St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"

DETERMINATION OF VIBRATION ENERGY FLUXES FROM ELECTRODYNAMIC INTERACTIONS IN SYSTEMS WITH CONDUCTIVE ELEMENTS

In the paper equations are given for calculating the values of vibrational energy fluxes and their spectral distributions, which are arising in system containing conductive elements during electrodynamic interactions between ones.

Keywords: conductive elements, electrodynamic interactions, vibration, sources' vibroactivity, electromechanical compatibility.

Проблема оценки виброактивности источников, возникающих при электродинамическом взаимодействии токов, протекающих по токопроводящим элементам (ТПЭ) конструкций электротехнического оборудования (ЭО) представляет интерес потому, что параметры вибрации, вызываемой указанным взаимодействием, должны учитываться в ходе проектирования, разработки и создания ЭО, удовлетворяющего современным требованиям по качеству и работоспособности, при обеспечении надежного функционирования самого ЭО, а также электромеханической их совместимости со связанными системами [1]-[3]. Учет указанных параметров также необходим для обеспечения соответствия нормам охраны среды обитания и труда обслуживающего персонала [4].

В ходе обычных расчетов вибрации электромеханических систем (ЭМС) часто предполагается, что основными ее источниками являются

силы, вызывающие колебания конструктивных элементов ЭМС, а механические свойства конструкций, отвечающие за распространение энергии, формирующейся в местах действия указанных сил, к местам ее проявления в виде вибрации учитываются только при решении соответствующих дифференциальных уравнений колебаний всей системы в целом [1].

Такой подход не позволяет раздельно решать задачи управления вибрацией ЭМС путем управления ею в источнике и управления вибрацией ЭМС на путях ее распространения, а следовательно, и реализовывать соответствующие конструктивные или эксплуатационные мероприятия. Подобный подход не позволяет также осуществлять сравнительную оценку различных источников в различных ЭМС без выполнения полного расчета вибрации всей конструкции, так как сравнение только сил без учета входных механических сопротивлений в окрестности их

точек приложения не дает возможности выносить обоснованные суждения об интенсивности формирования энергии в самих источниках.

Из-за сложности применения для систем с ТПЭ, обычно используемых схем расчета характеристик виброактивности в известной отечественной и зарубежной литературе отсутствуют какие-либо данные о расчетных оценках виброактивности, связанной с электродинамическим взаимодействием ТПЭ в подобных системах.

В то же время модельное исследование, представленное в [5] и основанное на использовании представлений о ПКЭ [6], связанных с действием таких источников, показало, что обозначенная виброактивность оказывается сравнимой с виброактивностью электродвигателей общепромышленного назначения и может даже превышать виброактивность последних, а для высоковольтных линий при больших значениях токов виброактивность от электродинамического взаимодействия проводов может быть сравнима (или превышать) виброактивность других известных источников виброактивности в подобных линиях.

Использование ПКЭ в оценках виброактивности ЭМС основывается на представлениях о том, что под действием сил, вызывающих вибрацию в ЭМС, в непосредственной окрестности точек их приложения из этих точек, как из центра, излучаются волны деформаций и напряжений, способные передавать импульс и энергию в удаленные точки конструкции. Поэтому ПКЭ, излучаемые из упомянутых точек приложения сил, в рамках указанных представлений должны выступать в качестве основной характеристики источников виброактивности ЭМС - критериев их виброактивности [7]. Численная оценка значений таких критериев позволяет тогда раздельно решать две ранее упомянутые задачи - оценки виброактивности собственно источников и оценки вибропроводящих свойств конструкции - и, соответственно, предпринимать раздельные шаги по управлению вибрацией ЭМС.

В настоящей работе на основе ранее выполненных исследований [8]–[10] представляются уравнения для численной оценки значений ПКЭ от источников, связанных с электродинамическим взаимодействием элементов системы с ТПЭ.

Для формального описания рассматриваемой системы $T\Pi \Im$ введем правую систему координат $x_1Ox_2x_3$ (рис. 1), связанную с внешним наблюдателем. Будем считать, что все $T\Pi \Im$ системы имеют определенную, заранее заданную форму, которую можно разбить на совокупность связанных между собой прямолинейных токопроводящих элементов, характеризуемых теми же параметрами, что и исходные $T\Pi \Im$ и в дальнешем называемые «проводниками». Тогда в дальнейшем, говоря о системе $T\Pi \Im$, мы будем представ-

лять ее в виде определенной совокупности подобных проводников. Пусть число проводников, входящих в такую систему, равно N.

Будем характеризовать каждый проводник с номером s (s=1,2,...,N) из указанной совокупности его ориентацией в системе координат $x_1Ox_2x_3$, связываемой с направлением протекания токов по нему, определяемой единичным вектором $\mathbf{l}_s=\mathbf{L}_s/L_s$ (L_s — длина выбранного отрезка токопровода; \mathbf{L}_s — вектор, длина которого равна L_s , а направление совпадает с направлением протекания по нему токов) с координатами $\mathbf{l}_{s1},\mathbf{l}_{s2}$ и \mathbf{l}_{s3} . Пусть также $\mathbf{r}_{s0}\equiv\begin{pmatrix} s^0\\x_1^s,x_2^s\\x_3^s\end{pmatrix}$ — радиус-вектор начальной точки этого проводника, а t — параметр, такой, что — $\infty < t < +\infty$ для любой точки прямой, проходящей через ось симметрии проводника, и $0 \le t \le 1$ для точек указанной прямой, принадлежащих рассматриваемому проводнику.

Считаем, что ток, протекающий по проводнику с номером s, имеет вид

$$\begin{split} I_s\left(t\right) &= \sum_{(n)} I_{sn}^+ \cos\left(\omega_{sn} \, t - \varphi_{sn}^+\right) + \\ &+ \sum_{(n)} I_{sn}^0 \cos\left(\omega_{sn} \, t - \varphi_{sn}^0\right) + \sum_{(n)} I_{sn}^- \cos\left(\omega_{sn} \, t - \varphi_{sn}^-\right), \end{split} \tag{1}$$

где величины I_{sn}^+ , I_{sn}^0 и I_{sn}^- обозначают амплитуды симметричных составляющих прямой, нулевой и обратной последовательностей с частотой ω_{sn} соответственно, а ϕ_{sn}^+ , ϕ_{sn}^0 и ϕ_{sn}^- начальные фазы указанных составляющих (в выбранной системе координат должны быть неотрицательными). Если же по проводнику протекает постоянный ток, то все составляющие в (1), кроме I_{s0}^0 , должны быть равны нулю, $\omega_{s0}=0$ и ϕ_{s0}^0 — фазовый угол этого тока в выбранной системе отсчета.

Представленными параметрами полностью определяется формализованное описание рассматриваемой системы ТПЭ, находящихся в состоянии электродинамического взаимодействия друг с другом. Согласно [20], в результате такого воздействия проводников с номерами $s = 1, 2, ..., N; s \neq m$) на проводник с номером m

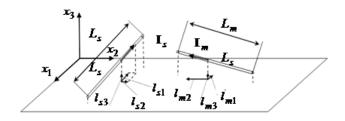


Рис. 1. Параметризация элементов токопроводов

в точке t_m $\left(0 \le t_m \le 1\right)$ на оси последнего (см. рис. 2) действуют силы

$$\mathbf{F}_{sm}\left(t_{m},t\right) = \operatorname{Re}\left[\sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{F}_{sm}^{n}\left(t_{m}\right) e^{-j\omega_{sm}^{n} t}\right], \quad (2)$$

являющиеся причиной формирования вибрации проводников в системе. В [10] показано, что комплекснозначные амплитуды $\mathbf{F}_{sm}^{\,\mathrm{n}} \left(t_m \right)$, соответствующие частотным составляющим $\omega_{sm}^{\,\mathrm{n}}$ в (2), являющиеся функциями точки t_m , зависят только от конструктивных параметров $\lambda_{sm} = L_m / L_s$ и $\delta_{sm} = \Delta_{sm}^0 / L_m$, где

$$\left(\Delta_{sm}^{0}\right)^{2} = \sum_{i=1}^{3} \left(x_{i}^{s0} - x_{i}^{m0}\right)^{2} ,$$

а также от гармонического состава токов (1), и в системе координат $x_1^0 O x_2^0 x_3^0$, связанной с проводником (см. рис. 2), равны

$$F_{sm}^{n}(t_{m}) =$$

$$= \frac{1}{2} (a_{sm} t_{m} + c_{sm}) \overline{J}_{sm}(t_{m}) \Phi_{sm}^{n} e^{-j \phi_{sm}^{n}}. \quad (3)$$

В [2] получены явные аналитические выражения для всех параметров, входящих в представления (2) и (3), причем показано, что векторные постоянные \mathbf{a}_{sm} зависят только от углов между векторами $\mathbf{1}_s$ и $\mathbf{1}_m$, а постоянные \mathbf{c}_{sm} — от указанных углов и параметра Δ_{sm}^0 , то есть не меняются при смещении начала координат вдоль проводника с номером m без поворота координатных осей.

Комплексные постояннные Φ^n_{sm} и фазовые углы ϕ^n_{sm} определяются только характеристиками токов (1), протекающих по проводникам с номерами s и m, а зависимость величин сил (2) от точек их приложения t_m определяется функциями $\bar{J}_{sm} \left(t_m \right)$, имеющими вид

$$\overline{J}_{sm}(t_m) = \frac{1}{\left\langle t_m^2 \left[1 - \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)^2 \right] + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2 \right\rangle} \times \left[\frac{1 - \lambda_{sm} t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{1 - 2\lambda_{sm} t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + \lambda_{sm}^2 t_m^2 + \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 + \lambda_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 \delta_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 \delta_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 \delta_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 \delta_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)} + \frac{t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)}{\sqrt{t_m^2 \delta_{sm}^2 \delta_{sm}^2}} + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)} + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right)} + t_m \left(\mathbf{l}_s \cdot \mathbf{l}_m \right) + t_m \left(\mathbf{l}_s$$

В работах [8] и [9] показано, что силам, представляемым в виде, совпадающем с представлением гармонических составляющих из (2), соответствуют излучаемые из точек приложения этих сил ПКЭ на частотах ω_{sm}^n , в результате переноса которых по конструктивным элементам ЭМС формируется виброакустическое поле, проявляющееся в виде вибрации ЭМС. Поэтому, учитывая сказанное в начале, следует считать, что за-

дача оценки виброактивности источников, связанных электродинамическим взаимодействием ТПЭ в системах с ТПЭ, состоит в том, чтобы, пользуясь результатами [8]—[10], получить уравнения, позволяющие рассчитывать значения ПКЭ, связанные с действием сил (2).

Средние по времени ПКЭ

Воспользовавшись результатами [9], применительно к рассматриваемой системе получаем, что распределение по направлениям средних (по времени) ПКЭ, излучаемых из точки приложения силы, соответствующей *n*-й гармонике в (2), в системе координат, связанной с направлением действия этой составляющей, описывается векторами плотности потоков [9]:

$$H_{sm}^{ln1}(k) = \frac{\left| F_{sm}^{n}(t_{m}) \right|^{2}}{2\overline{L}_{m}^{2}(16\pi)^{2} \rho_{m} c_{lm}} x^{l1}(\theta, \varphi),$$

$$H_{sm}^{tn1}(k) = \frac{1}{32} \frac{\left| F_{sm}^{n}(t_{m}) \right|^{2}}{(16\pi)^{2} \overline{L}_{m}^{2} \rho_{m} c_{tm}} x^{t1}(\theta, \varphi).$$
(5)

В выражениях (5) введены следующие обозначения: $\mathbf{H}_{sm}^{ln1}(\mathbf{k})$ — вектор плотности ПКЭ, переносимых упругими волнами деформации и напряжений с продольной поляризацией, имеющими частоту ω_{sm}^n , через элементарные площадки, размещаемые в точке t_m проводника с номером m, ориентация которых в указанной системе координат изменяется в пределах телесного угла $d\mathbf{k}$ вблизи направления \mathbf{k} ; $\mathbf{H}_{sm}^{tn1}(\mathbf{k})$ — аналогичный вектор плотности ПКЭ, переносимых упругими волнами деформаций и напряжений с поперечной поляризацией, имеющими частоту ω_{sm}^n ; ρ_m — материальная плотность вещества проводника с номером m; c_{lm} и c_{tm} — скорости продольного и поперечного звука соответственно в материале проводника с номером m;

 $ar{L}_m = \sqrt{S_m^{\,\mathrm{np}}/\pi}$ — линейный размер поперечного сечения проводника ($S_m^{\,\mathrm{np}}$ — площадь его поперечного сечения). Вектор-функции $\mathbf{x}^{\,l1}ig(\theta,\phiig)$ и

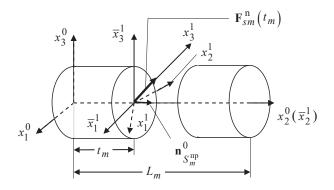


Рис. 2. Системы координат для описания рассматриваемых взаимодействий

 $\mathbf{x}^{t1}(\theta, \phi)$ описывают угловое распределение соответственных потоковых составляющих в системе координат, связанной с направлением $\mathbf{F}_{sm}^{\,\mathrm{n}}(t_m)$, и определяются уравнениями

$$\mathbf{x}^{l1}(\theta, \varphi) = \cos\theta \begin{vmatrix} \sin^{2}\theta\cos\varphi \\ \sin^{2}\theta\sin\varphi \\ 2 \end{vmatrix} - \sin^{3}\theta \begin{vmatrix} 0\\ 0\\ 1 \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{x}^{t1}(\theta, \varphi) = \begin{vmatrix} 0\\ 0\\ \sin\theta - 2\cos\theta \end{vmatrix} +$$

$$+ \left(\frac{4}{\pi} - \cos\theta\sin\theta\right) \begin{vmatrix} \cos\varphi\sin\theta \\ \sin\varphi\sin\theta \\ - \cos\theta \end{vmatrix},$$

$$= \cos\theta$$

где θ и ϕ — полярные координаты вектора ${\bf k}$ в указанной системе координат $0 \le \theta \le \pi/2$, $0 \le \phi \le 2\pi$ (см. рис. 2).

Пусть в системе координат, связанной с проводником, θ_{sm}^{n0} и ϕ_{sm}^{n0} — полярные углы вектора $F_{sm}^{n}(t_m)$ (то есть полярные углы направления действия рассматриваемой составляющей силы, приложенной в точке t_m проводника с номером m), а вектор внешней нормали к поперечному сечению этого проводника

$$\mathbf{n}_{S_m^{ ext{inp}}}^0 = egin{bmatrix} 0 \ 1 \ 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда в системе координат, связанной с направлением действующей силы, для вектора внешней нормали к поперечному сечению проводника [9]

$$\mathbf{n}_{S_m^{\text{IIP}}}^1 = \begin{vmatrix} \cos\theta_{sm}^{n0} \sin\phi_{sm}^{n0} \\ \cos\phi_{sm}^{n0} \\ \sin\theta_{sm}^{n0} \sin\phi_{sm}^{n0} \end{vmatrix}. \tag{7}$$

Отсюда для ПКЭ, переносимого волнами с продольной поляризацией и рассматриваемой частоты через поперечное сечение $S_m^{\, \mathrm{np}}$, размещаемое в точке t_m проводника с номером m, будем иметь:

$$H_{sm}^{ln}(t_m) = \frac{\left|\mathbf{F}_{sm}^{n}(t_m)\right|^2}{2\overline{L}_{m}^{2}(16\pi)^2 \rho_m c_{lm}} \times \sum_{0}^{2\pi} d\phi \int_{0}^{\pi/2} \mathbf{x}^{l1}(\theta,\phi) \cdot \mathbf{n}_{S_{m}^{\text{np}}}^{1} \sin\theta d\theta. \tag{8}$$

Воспользовавшись (6) и (7) для определения скалярного произведения, стояще-го под знаком

интеграла в (8) и осуществляя интегрирование, находим:

$$H_{sm}^{ln}\left(t_{m}\right) = \frac{16 - 3\pi}{32^{2}\pi} \frac{\left|\Phi_{sm}^{n}\right|^{2}}{\overline{L}_{m}^{2} \rho_{m} c_{lm}} \times \left(U_{sm}\left(t_{m}\right) \sin\theta_{sm}^{n0} \sin\phi_{sm}^{n0}\right), \tag{9}$$

где

$$U_{sm}(t_m) =$$

$$= \left[\left| \mathbf{a}_{sm} \right|^2 t_m^2 + 2 \left(\mathbf{a}_{sm} \cdot \mathbf{c}_{sm} \right) t_m + \left| \mathbf{c}_{sm} \right|^2 \right] \times \left[\bar{J}_{sm}(t_m) \right]^2.$$
(10)

Для ПКЭ, переносимых волнами рассматриваемой частоты с поперечной поляризацией через поперечное сечение $S_m^{\rm пp}$, размещаемое в точке t_m проводника с номером m, точно так же получаем

$$H_{sm}^{tn}\left(t_{m}\right) = \frac{\left|\mathbf{F}_{sm}^{n}\left(t_{m}\right)\right|^{2}}{32\overline{L}_{m}^{2}\left(16\pi\right)^{2} \rho_{m} c_{tm}} \times \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \int_{0}^{\pi/2} d\phi \int_{0}^{\pi} \mathbf{x}^{1t}\left(\theta,\phi\right) \cdot \mathbf{n}_{S_{m}^{\text{np}}}^{1} \sin\theta d\theta$$

или

$$H_{sm}^{tn}(t_m) = \frac{5\pi^2 - 16\pi - 32}{2^{18}\pi^2} \frac{\left|\Phi_{sm}^n\right|^2}{\bar{L}_m^2 \rho_m c_{tm}} \times U_{sm}(t_m) \sin\theta_{sm}^{n0} \sin\phi_{sm}^{n0}.$$
(11)

Результирующие ПКЭ (включающие как продольные, так и поперечные компоненты), формируемые рассматриваемой составляющей силы (2), приложенной к точке t_m проводника с номером m, и переносимые через поперечное сечение $S_m^{\text{пр}}$, размещаемое в той же точке, находятся в результате суммирования (9) и (11):

$$H_{sm}^{n}(t_m) = H_{sm}^{ln}(t_m) + H_{sm}^{tn}(t_m).$$

Спектральные распределения ПКЭ

Найденные выражения для средних значений ПКЭ, соответствующих гармоникам, входящим в суперпозицию (2), позволяют определить характеристики распределения ПКЭ по спектру — энергетические спектральные плотности этих величин [9].

Нетрудно видеть, что энергетические спектральные плотности ПКЭ, излучаемые в продольных и поперечных составляющих в проводник с номером m через его поперечное сечение, размещаемое в точке t_m , при взаимодействии

этого проводника с проводником, имеющим номер s, будут [9]:

$$w_{sm}^{l0}(\omega;t_m) = \sum_{n=1}^{\infty} H_{sm}^{ln}(t_m)\delta(\omega - \omega_{sm}^n),$$

$$w_{sm}^{t0}(\omega;t_m) = \sum_{n=1}^{\infty} H_{sm}^{tn}(t_m)\delta(\omega - \omega_{sm}^n),$$
(12)

где $\delta\left(\omega-\omega_{sm}^{n}\right)$ – дельта-функция Дирака. Вводимыми (12) функциями, например $w_{sm}^{l0}\left(\omega;t_{m}\right)$, определяется, что $w_{sm}^{l0}\left(\omega;t_{m}\right)d\omega$ равно тому количеству колебательной энергии, которое излучается рассматриваемым источником в проводник с номером m в продольных составляющих за единицу времени в частотном диапазоне от ω до $\omega+d\omega$ через единицу поперечного сечения, располагаемого в точке t_{m} . Аналогичная функция спектральной плотности для суммарного излучения (как в продольных, так и в поперечных составляющих) $w_{sm}^{0}\left(\omega;t_{m}\right)$ должна находиться путем суммирования функций, из выражения (12).

Подставляя (9) и (11) в (12), получаем:

$$w_{sm}^{l0}\left(\omega;t_{m}\right) = \frac{1}{c_{lm}} V_{sm}\left(t_{m}\right) \alpha_{sm}\left(\omega\right),$$

$$w_{sm}^{t0}\left(\omega;t_{m}\right) =$$

$$= \frac{5\pi^{2} - 16\pi - 32}{2^{8}\pi(16 - 3\pi)} \frac{1}{c_{tm}} V_{sm}\left(t_{m}\right) \alpha_{sm}\left(\omega\right),$$
(13)

где

$$V_{sm}\left(t_{m}\right) = \frac{16 - 3\pi}{32^{2}\pi} \frac{U_{sm}\left(t_{m}\right)}{\overline{L}_{m}^{2} \rho_{m}},$$

$$\alpha_{sm} = \sum_{n=1}^{\infty} \left|\Phi_{sm}^{n}\right|^{2} \sin\theta_{sm}^{n0} \sin\phi_{sm}^{n0} \delta\left(\omega - \omega_{sm}^{n}\right).$$
(14)

Уравнения (13) и (14) дают возможность определять другие частотные и пространственные распределения по проводникам рассматриваемой системы колебательной энергии, поставляемой в систему источниками, связанными с электродинамическим взаимодействием проводников. Так, функции

$$w_{m}^{l0}\left(\omega;t_{m}\right) = \frac{1}{c_{lm}} \sum_{\substack{s=1\\\left(s\neq m\right)}}^{N} V_{sm}\left(t_{m}\right) \alpha_{sm}\left(\omega\right)$$

И

$$w_{m}^{t0}(\omega;t_{m}) = \frac{5\pi^{2} - 16\pi - 32}{2^{8}\pi(16 - 3\pi)} \frac{c_{lm}}{c_{tm}} w_{m}^{l0}(\omega;t_{m})$$

описывают изменения результирующих частотных распределений компонентов ПКЭ различной поляризации, формируемых в проводнике с номером m при его взаимодействии со всеми

другими проводниками системы, при перемещении вдоль этого проводника. Величинами

$$w_{sm}^{l0}(\omega) = \frac{1}{c_{lm}} \alpha_{sm}(\omega) \int_{0}^{1} V_{sm}(t_{m}) dt_{m},$$

$$w_{sm}^{t0}(\omega) = \frac{5\pi^{2} - 16\pi - 32}{2^{8}\pi(16 - 3\pi)} \frac{c_{lm}}{c_{tm}} w_{sm}^{l0}(\omega),$$
(15)

$$w_{m}^{l0}(\omega) = \frac{1}{c_{lm}} \sum_{\substack{s=1\\(s\neq m)}}^{N} \alpha_{sm}(\omega) \int_{0}^{1} V_{sm}(t_{m}) dt_{m},$$

$$w_{m}^{t0}(\omega) = \frac{5\pi^{2} - 16\pi - 32}{2^{8}\pi(16 - 3\pi)} \frac{c_{lm}}{c_{tm}} w_{m}^{l0}(\omega),$$
(16)

следует оценивать частотные распределения полной энергии, поставляемой составляющими ПКЭ различной поляризации в проводник с номером m при его взаимодействии с проводником, имеющем номер s, а также со всеми остальными проводниками системы соответственно, то есть той энергии, которая вызовет вибрацию системы. А использование (15) и (16) предоставляет возможность получать соответственные характеристики, отнесенные к заданным полосам частот $\omega_{\min} \le \omega \le \omega_{\max}$:

$$egin{aligned} W_{sm}^{l0}ig(t_mig) &= \int\limits_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{sm}^{l0}ig(\omega\,;t_mig)d\omega, \ W_{sm}^{t0}ig(t_mig) &= \int\limits_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{sm}^{t0}ig(\omega\,;t_mig)d\omega, \ W_{m}^{l0}ig(t_mig) &= \int\limits_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{m}^{l0}ig(\omega\,;t_mig)d\omega, \ W_{m}^{t0}ig(t_mig) &= \int\limits_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{m}^{t0}ig(\omega\,;t_mig)d\omega, \ W_{sm}^{t0} &= \int\limits_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{sm}^{t0}ig(\omega\,)d\omega, \ W_{sm}^{t0} &= \int\limits_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{sm}^{t0}ig(\omega\,)d\omega, \end{aligned}$$

$$W_{m}^{l0} = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{m}^{l0}(\omega) d\omega, \quad W_{m}^{t0} = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_{m}^{t0}(\omega) d\omega.$$

В работе на основе использования представлений о ПКЭ получены в явном виде уравнения, позволяющие анализировать и численно оценивать виброактивность источников вибрации,

связанной с электродинамическим взаимодействием ТПЭ в системах с ТПЭ.

Представленные уравнения, в частности, показывают, что в подобных системах спектральный состав рассматриваемых источников может существенно изменяться при переходе от одного ТПЭ к другому, и отдельные составляющие спектра таких источников могут по-разному проявляться в различных местах конструкции.

Представленные уравнения следует использовать при создании систем автоматизированной оценки виброактивности систем с ТПЭ.

Библиографический список

- 1. *Александров А. А.* и др. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования Л.: Судостроение, 1986. 276 с.
- $2.\ \mathit{Белов}\ \mathit{M}.\ \mathit{\Pi}.\ \mathsf{u}$ др. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. М.: Академия, $2006.\ 368\ \mathrm{c}.$
- 3. Sepp Yu. I., Leonikhine K. Method for Estimation of Vibration Activity in a System of Electrical Switchboards Conductive Elements // Proceedings of The IEEE Russia North West Section. St. Petersbutrg: IEEE Russia (Northwest) Section. 2012. Vol. 3. Pp. 35.
- 4. Суворов Г. А., Шкаринов Л. Н. Денисов Э. И. Гигиеническое нормирование производственных шумов и вибраций. М.: Медицина, 1984. 240 с.

- 5. Sepp Yu. I., Fedorov N. I. Utmost Vibration Levels Arising out of Electrodynamical Interaction Between Current-Carriers // Proceedings of the 2017: IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus). February 1–3. 2017. St. Petersburg, Russia. St. Petersburg. 2017. Pp. 154.
- 6. Попков В. И. Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов. Л.: Судостроение, 1974. 224 с.
- 7. Cenn Ю. И. Разработка метода оценки виброактивности магнитных источников в электрических машинах по потокам колебательной энергии // Техническая акустика. СПб.: Восточноевропейская ассоциация акустиков, 1993. Т. II. Вып. 2(4). С. 47.
- 8. Sepp Yu., Komrakov I. Vibration Energy Fluxes Emitting by Source of Vibration Concentrated in the Point Inside Infinite Elastic Media // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 ElConRusNW): IEEE. February 2–3. 2016. St. Petersburg, Russia. Vol. II. Pp. 179.
- 9. Cenn Ю. И. Основы оценки источников виброактивности в электромеханических системах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 104 с.
- 10. Сепп Ю. И., Федоров Н. И. Определение сил электродинамического взаимодействия в системе токопроводящих элементов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018 (в печати).

УДК 621.311

О. Я. Соленая*

кандидат технических наук, доцент

С. Ю. Лач*

магистрант

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для эффективной работы электроэнергетической системы необходима правильно спроектированная электрическая сеть. В работе рассмотрена возможность расчета и проверки ключевых параметров электрической сети с помощью программного комплекса DigSilent PowerFactory. Раскрыты особенности моделирования установившегося режима электрической сети, проведен расчет токов короткого замыкания, определены режимные параметры электрической системы в нормальном и аварийном режимах работы.

Ключевые слова: установившийся режим, короткое замыкание, моделирование, электроснабжение, электроэнергетическая система. PowerFactory.

O. Ya. Solenaya*

PhD, Tech., Associate Professor

S. Yu. Lach*

Postgraduate Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MODELING OF EMERGENCY REGIMES OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

For the efficient operation of the electric power system, a properly designed electrical network is necessary. The paper considers the possibility of calculating and verifying key parameters of an electrical network using the DIgSilent PowerFactory software package. The features of modeling the steady state of the electric network are revealed, the calculation of the short-circuit currents is made, the regime parameters of the electrical system are determined in normal and emergency operation modes.

Keywords: steady state, short circuit, simulation, power supply, electric power system, PowerFactory.

В современном мире электроэнергия занимает важнейшее место в жизнедеятельности человека. Получение электроэнергии потребителем обеспечивается электроэнергетической системой (ЭЭС), основной задачей которой является надежное и энергоэффективное снабжение потребителей электричеством с учетом обеспечения необходимого качества энергии. ЭЭС состоит из нескольких групп элементов:

- основные (силовые) элементы - генерирующие агрегаты электростанций, преобразующие энергию воды или пара в электроэнергию; трансформаторы, автотрансформаторы, выпрямительные установки, преобразующие значения и вид тока и напряжения; линии электропередач (ЛЭП), передающие электроэнергию на расстояние; коммутирующая аппаратура (выключатели, разъединители), предназначенные для изме-

нения схемы ЭЭС и отключения поврежденных элементов;

– измерительные элементы и средства управления – трансформаторы тока и напряжения, предназначенные для подключения измерительных приборов, средств управления и регулирования, релейная защита, регуляторы, автоматика, телемеханика, связь, обеспечивающие оперативное и автоматическое управление схемой и работой ЭЭС.

Функционирование единой энергетической системы невозможно без применения программно-вычислительных комплексов для расчета режимов. Благодаря им планируется работа основного электрооборудования, прогнозируется изменение параметров режима электрической системы, исследуется устойчивость параллельной работы генерирующего оборудования, рассма-

триваются различные сценарии возможных аварий, что позволяет разработать мероприятия по их предотвращению и ликвидации.

Целью данной работы является моделирование аварийных режимов, протекающих в электроэнергетических системах, и проведение анализа изменения режимных параметров ЭЭС. В современных экономических условиях актуальность работы определяется появлением все большего числа новых потребителей, а также повышением ответственности энергоснабжающих организаций за качество, надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей.

Для достижения поставленной цели необходимо провести обзор современного программного обеспечения (ПО), применяемого для моделирования различных режимов работы электрических сетей, и разработать методику оценки изменения параметров режима.

Под режимом работы ЭЭС понимается ее состояние в заданный момент или отрезок времени. Режим определяется составом включенных основных элементов ЭЭС и их загрузкой. Параметры режима характеризуют значения напряжений, мощностей и токов элементов, а также частоты, которые определяют процесс производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Большую часть времени ЭЭС работает в нормальном установившемся режиме, однако периодически в ней могут возникать аварийные режимы, которые могут быть вызваны короткими замыканиями (КЗ) или разрывами цепи передачи электроэнергии из-за внешних воздействий окружающей среды и повреждения электрооборудования. Данные режимы также могут быть инициированы ложными срабатываниями средств автоматической защиты или ошибками эксплуатационного персонала.

Для расчета режимов работы ЭЭС используется специализированное программное обеспечение. Данные расчеты необходимы для предотвращения перерывов в электроснабжении потребителя при возникновении аварийного режима на каком-либо участке сети. Расчет всех вариантов вручную может занимать длительное время, поэтому в настоящее время его активно заменяют на машинный. Это позволяет не только сократить время, затрачиваемое на расчет, но и увеличить его точность.

Существуют следующие программно-вычислительные комплексы (ПВК), предназначенные для электрических расчетов:

– SDO-6. Предназначен для решения задач анализа и синтеза, возникающих при исследовании установившихся режимов ЭЭС, а также может использоваться при эксплуатации и проектировании электрических систем в рамках АСДУ, САПР и АРМ [1]. Данный программновычислительный комплекс позволяет моделиро-

вать действие и работу устройств, предназначенных для управления напряжением, перетоками, активной и реактивной мощности, генерацией и потреблением, а также работу некоторых видов противоаварийной автоматики — от наброса мощности, повышения или понижения напряжения. Также данный ПВК содержит достаточно полное математическое описание основных элементов сети ЭЭС.

– ДАКАР. Предназначен для расчета и анализа установившихся нормальных, предельных и послеаварийных режимов работы электрических сетей напряжением 0,4–1150 кВ, а также анализа устойчивости ЭЭС [2]. Достоинством данного ПВК является возможность определять режим работы электрической сети на основе данных устройств телеметрии. А именно импортировать значения телеизмерений и телесигналов с оперативно-информационного комплекса, что позволяет имитировать режимы работы сети для принятия решений в процессе диспетчерского управления на основании результатов анализа установившихся режимов.

- RastrWin. Используется для решения задач расчета, анализа и оптимизации установившихся режимов ЭЭС [3]. Этот ПВК используется более чем в 150 организациях на территории России, Казахстана, Киргизии, Беларуси, Молдовы, Монголии и Сербии. Данный ПВК состоит из модулей, которые решают конкретные задачи. Это является как плюсом данной программы, так и значительным минусом. Например, модуль RastrKZ для расчета несимметричных режимов имеет недостаток в виде отсутствия возможности динамического анализа электроэнергетической системы, и для решения данной задачи авторами программы выпущена дополнительное ПО – Rustab.

– DIgSilent PowerFactory. Является комплексным инструментом для решения задач планирования, анализа и управления режимами электрических сетей и систем [4]. В состав этого ПВК входит база данных, содержащая всю необходимую информацию об оборудовании электрической сети (например, параметры линий электропередачи, генераторов, защитных устройств, регуляторов и т. д.). В частности, с помощью PowerFactory можно рассчитать установившийся режим и устойчивость электрической сети, токи КЗ, провести координацию работы защитных устройств, а также модальный анализ и анализ по гармоникам. Этот программный продукт также используется для анализа эффективности и оптимизации режимов работы ЭЭС и систем автоматического управления.

Анализ данных комплексов показал, что многие из них имеют значительные недостатки. Сводная таблица функций ПВК представлена в табл. 1. Например, с помощью ПВК SDO-6 невозможно провести расчет токов КЗ и анализ

Таблица 1 Сопоставление функций программно-вычислительных комплексов

	Решаемые задачи						
Наименование ПВК	Расчет режима	Частотный анализ	Оптимизация режима	Расчет токов КЗ	Анализ стати- ческой устойчи- вости	Анализ динами- ческой устойчи- вости	
РТП 3 (для разо- мкнутой сети)	+	_	_	+	_	_	
SDO-6	+	+	+	_	+	_	
Дакар	+	+	+	+	+	+	
Energy CS	+	_	-	+	+		
RastrWin 3	+	_	+	+	+	_	
EUROSTAG	+	+	1	_	+	+	
PSS/E	+	+	+	+	+	+	
DIgSilent PowerFactory	+	_	+	+	+	+	

динамической устойчивости системы, а также данный ПВК работает под MS DOS, хотя ведется разработка версии, работающей и под Windows.

В зарубежных программах, таких как EUROSTAG и PSS/E, используются упрощенные модели некоторых элементов. В модели трансформатора, например, не учтены потери холостого хода, что делает невозможным решение задач реконструкции на постсоветском пространстве. В то же время в комплексе RastrWin решаются задачи расчета, анализа и оптимизации установившихся режимов электрических сетей. В данном ПВК невозможно провести расчет токов КЗ, который необходим для оценки коммутационного ресурса выключателей, выбора оборудования и установок устройств РЗ.

Объектом исследования для дальнейшего моделирования является схема электрической сети, снабжающая электроэнергией крупные потребительские подстанции напряжением 110 и 220 кВ промышленных и сельскохозяйственных потребителей, приведенная на рис. 1.

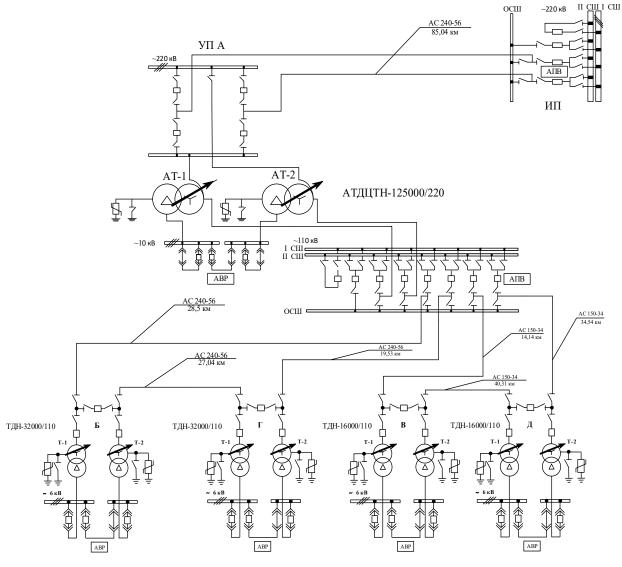


Рис. 1. Схема исследуемой электрической сети

Условно схема разделена на систему внешнего и внутреннего электроснабжения. Система внешнего электроснабжения питается на напряжении 220 кВ и включает в себя: источник питания, в качестве которого выступает трансформаторная подстанция (ТП) теплоэлектростанции; воздушные линии электропередач, выполненные проводами марки АС-240/56 с подвеской на опорах двумя одноцепными линиями; узловую понижающую распределительную ТП, которая выступает источником питания для сети внутреннего электроснабжения; комплекс устройств РЗиА. Система внутреннего электроснабжения состоит из двух групп потребительских подстанций, каждая из которых питается на напряжении 110 кВ по замкнутым схемам от узловой двухтрансформаторной подстанции с автотрансформаторами типа АТДЦТН-125000/220/110/10. В первой группе потребителей используются двухобмоточные трансформаторы типа ТДН-32000/110/6(10), во второй – TДH-16000/110/6(10).

Для обеспечения надежного электроснабжения на каждой потребительской подстанции установлены по 2 трансформатора с учетом резервирования. Для проведения автоматического перевода питания потребителей в случае аварийного отключения одного из силовых трансформаторов или ЛЭП в схеме электроснабжения предусмотрено наличие автоматических средств защиты — устройств автоматического ввод резерва (АВР) и автоматического повторного включения (АПВ). При таких схемах подключения вы-

полняются основные требования по надежности и безопасности электрической сети.

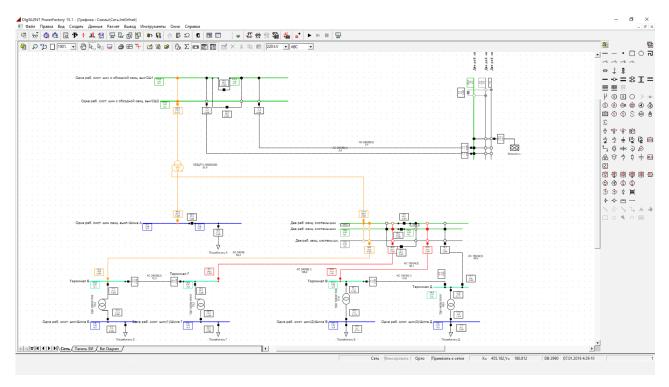
Для моделирования аварийных режимов данной электрической сети выбрано программное обеспечение DIgSilent PowerFactory, поскольку оно в полной мере позволяет:

- определять, измерять и упорядочивать варианты исследования, использовать основные численные методы;
- проводить расчеты и анализ уровня напряжения в узлах распределительной сети, определять нагрузки фидеров на основе данных по перетокам мощности от источника питания до конечного потребителя;
- проводить расчеты гармоник и анализ качества электроэнергии;
- моделировать различные виды отказов электрической сети;
- учитывать экономические показатели для каждого из вариантов развития сети.

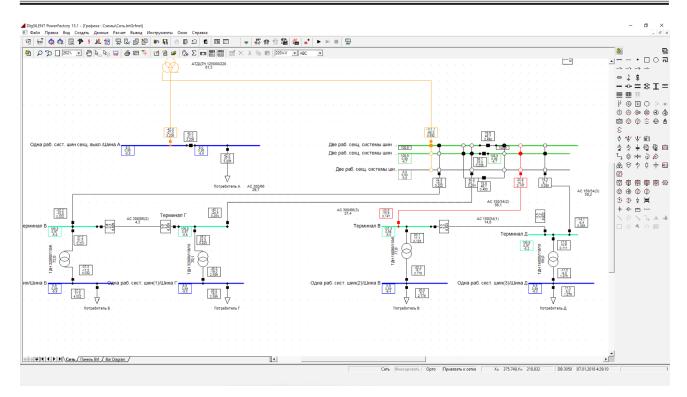
Кроме того, оно имеет интегрированную интерактивную однолинейную графическую и информационную программную обложку, базу данных элементов электрических систем и исходных параметров по типам оборудования.

Также стоит отметить, что данный комплекс имеет удобный русскоязычный интерфейс (начиная с 14-й версии) и имеет встроенную базу данных элементов электрической сети.

В результате моделирования исходной схемы электрической сети в DIgSilent PowerFactory получена однолинейная электрическая схема (рис. 2). С помощью встроенной базы данных за-



Puc. 2. Расчетная схема электрической сети в программном комплексе Power Factory с результатами расчета установившегося режима



Puc. 3. Расчетная схема внутреннего электроснабжения электрической сети в программном комплексе Power Factory с результатами расчета установившегося режима

даны параметры основного силового электрооборудования и ЛЭП. Выполнен расчет установившегося режима и получены основные режимные параметры.

В информационном окне на шинах выводятся следующие данные:

- фактического напряжения, кВ;
- фактического напряжения, о. е.;
- коэффициента мощности cosф.

В информационном окне на ЛЭП, трансформаторах и на шинах подключения потребителей выводятся данные:

- активной мощности, МВт;
- реактивной мощности, Мвар;
- загруженность линии, %.

В результате моделирования выявлено, что трансформаторы системы внешнего электроснабжения загружены всего на 81%, что означает возможность подключения новых потребителей – развития электрической сети (рис. 2).

По итогам расчета системы внутреннего электроснабжения было выявлено, что пропускной способности ЛЭП АС 240/56 (1) недостаточно для покрытия пиковых нагрузок потребительской подстанции Γ , поскольку загрузка на ней составила 106%. Следовательно, необходимо рассмотреть возможность замены данной ЛЭП для кольцевой системы электроснабжения потребителей Γ и Γ на линию большего сечения. Для этого была выбрана ЛЭП марки АС 300/66, заданы ее параметры и рассчитан установившийся режим работы ЭЭС. В результате моделирования выявлено, что установка проводов данной мар-

ки позволила повысить пропускную способность ЛЭП и снизить ее загруженность до 37% (рис. 3).

В ходе проведения исследований были проанализированы значения активной, реактивной, полной мощности в ЛЭП и переданной мощности потребителю, а также значения фактического напряжения на шинах низкого напряжения трансформаторных ПС и коэффициенты мощности.

По результатам расчета определяем отклонение напряжения на низкой стороне трансформаторной ПС от желаемого в режиме максимальной нагрузки:

– желаемое напряжение на шинах потребителей в режиме максимальной нагрузки

$$U_{H.\mathcal{K}} = 1,05U_{H.CETH} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ kB};$$

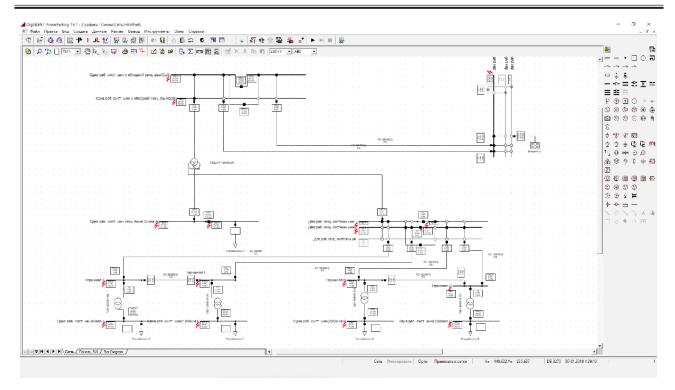
- отклонение напряжения

$$\delta U = \left| \frac{U_{H.\Phi AKT.} - U_{H.\mathcal{K}.}}{U_{H.\mathcal{K}.}} \right| \cdot 100 =$$

$$= \left| \frac{10,2 - 10,5}{10,5} \right| \cdot 100 = 2,85\%.$$

Расчеты показали, что отклонение превышает допустимое значение, следовательно, желаемый уровень напряжения на шинах нагрузки не обеспечивается. Для этого необходимо отрегулировать напряжение источника питания и выполнить моделирование работы трансформаторов на ПС с помощью подключения устройств РПН.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



Puc. 4. Расчетная схема электрической сети в программном комплексе Power Factory с результатами расчета токов короткого замыкания

Исследование устойчивости энергосистем включает в себя анализ режимов энергосистем в условиях до и после внезапных изменений нагрузки или генерации, во время повреждений и плановых отключений. Устойчивость энергосистемы определяется ее способностью сохранять устойчивую работу в нормальных условиях, а также при возникновении возмущений. Поэтому необходимо проектировать и эксплуатировать энергосистемы таким образом, чтобы энергосистема смогла противостоять событиям, приводящим к возникновению аварийных ситуаций без сброса нагрузки. В соответствии с тремя возможными временными диапазонами ПП в энергосистемах можно классифицировать следующим образом:

- кратковременные или электромагнитные $\Pi\Pi$;
- средней длительности или электромеханические $\Pi\Pi$;
 - длительные ПП.

Переходные процессы, вопросы устойчивости и задачи управления являются важными при планировании, проектировании и функционировании современных энергосистем. Исследования, в которых рассматриваются электромагнитные переходные процессы и различные аспекты устойчивости, можно выполнить в PowerFactory с помощью динамического моделирования для различных периодов времени либо с помощью инструментария анализа статической и динамической устойчивостей.

В ходе моделирования аварийного режима работы ЭЭС был проведен расчет токов КЗ дан-

ной системы электроснабжения. Моделирование проводилось согласно МЭК 60909 [6]. Время отключения было задано 0,1 с, а время КЗ -1 с. В результате были получены максимальные токи КЗ (рис. 4).

В дальнейшей работе по магистерской диссертации планируется с использованием данного программного обеспечения провести: полный расчет установившегося режима развернутой схемы электроэнергетической системы в режиме максимальной и минимальной нагрузки потребителей; моделирование аварийных режимов симметричного и несимметричных видов КЗ на трех уровнях класса напряжений - 220, 110 и 6(10) кВ; проанализировать режимы работы и оценить соответствие показателей режимов схемы электроснабжения группы потребителей нормативным; разработать мероприятия по оптимизации режимов работы ЭЭС с учетом минимизации потерь активной мощности и отклонения напряжения на шинах потребителей.

В результате проведенного анализа существующего программного обеспечения электроэнергетического профиля было выявлено, что
ПВК DIgSilent PowerFactory совмещает в себе
удобный и простой в освоении интерфейс, а также обширный функционал, который позволяет
с высокой степенью точности проводить расчет и
анализ режимов работы электроэнергетических
систем, на основании которых возможно решение задач оптимизации и энергоэффективности
работы современных схем электроснабжения.

Библиографический список

- 1. Программа СДО-6: Неофициальный сайт режимщиков. URL: http://regimov.net/content. php/49-%D0%A0%D0%8E%D0%A0%E2%80%9D%D0%A0%D1%9B-6.
- 2. Dakar: Неофициальный сайт режимщиков. URL: http://regimov.net/content.php/68-Dakar.
- 3. RastrWin3 Документация пользователя: Официальный сайт разработчиков RastrWin. URL: http://www.rastrwin.ru/rastr/RastrHelp. php.
- 4. Программа DIgSILENT PowerFactory: Официальный сайт. URL: http://www.digsilent.de.
- 5. *Казакул* А. А. Промышленные программновычислительные комплексы в электроэнергетике / Сост. Казакул А. А. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. 86 с.
- 6. IEC 60909-0(2016). Токи короткого замыкания в системах трехфазного переменного тока. $154\ c.$

УДК 621.311.25

С. С. Тимофеев

старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

И. Ф. Максимова

научный сотрудник Институт электрофизики и электроэнергетики

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В РОССИИ И МИРЕ

В статье рассматриваются существующие проблемы использования солнечных энергетических установок. Показаны перспективы развития солнечной энергетики в России и мире.

Ключевые слова: солнечная энергетика, автономные солнечные фотоэлектрические установки, фотоэлектрические модули, параболоцилиндрические концентраторы, отражатели и гелиостаты.

S. S. Timofeyev

Senior Lecturer of the Chair of Electromechanics and Robotics St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

I. F. Maksimova

Researcher

Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering

PROBLEMS OF SOLAR POWER INSTALLATIONS USING IN RUSSIA AND THE WORLD

The article deals with the existing problems of using solar power plants. The prospects of development of solar energy in Russia and the world are shown.

Keywords: solar energy, solar photovoltaic installation, photovoltaic modules, parabolic-sylindrical hub, reflectors and heliostats.

Солнечная энергетика — одно из наиболее перспективных направлений возобновляемой энергетики, основанное на непосредственном использовании солнечного излучения для получения электрической и тепловой видов энергии. Как заявляют эксперты, количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли в течение недели, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана¹.

Последние пять-семь лет солнечные технологии в мире демонстрируют небывалые для энергетики темпы роста установленных мощностей – 40-55% в год. По этому показателю солнечная энергетика опережает ветровую энергетику и все остальные энергетические технологии. Цены на кремний «солнечного качества», поставляемый на энергетический рынок, в основном Китаем, за

последние четыре-пять лет снизились в 18 раз. А доля стоимости кремния в составе моно- и поликристаллических $\Phi \Theta \Pi$ доходит до 50-70%.

После 2016 года прогнозируется более низкая стоимость солнечной энергии в сравнении с ветровой. Это будет основой опережающего развития солнечной энергетики в перспективе, и можно рассчитывать на вытеснение основных энергетических технологий солнечными на большинстве территорий уже к 2025–2030 г. [1].

Для характеристики общемирового состояния можно добавить, что годовой темп роста инвестиций в солнечную энергетику в последние пять лет составил 56,4% [2].

На рис. 1 показан рост установленной мощности PV — солнечных электростанций (Photovoltaic Solar Power) в различных странах мира. Очевидно, что такие темпы роста не могут продолжаться длительное время, однако ожидаемый семи-восьмикратный прирост производ-

¹ Solar Energy today / Alternative Energy. New York, 2014

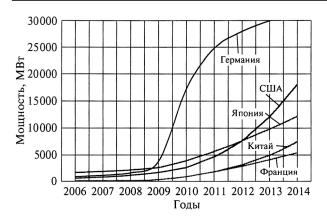


Рис. 1. Рост установленной мощности PV – солнечных электростанций

ства электроэнергии за десять лет (2015–2025 г.) должен вывести солнечную энергетику на первое место среди всех технологий генерации энергии на возобновляемых ресурсах.

Согласно статистике российского АО «Системный оператор Единой энергетической системы», на 1 июля 2016 года суммарная мощность солнечных электростанций в стране составляла 60,2 МВт (0,02% от общего производства энергии), ветряных — 10,90 МВт.

Существует несколько типов солнечных электростанций (СЭС), отличающихся способами преобразования энергии солнечного излучения и конструкцией [1, 2, 3, 4]. Каждому типу СЭС соответствует определенный тип солнечных модулей: фотоэлектрические модули, параболоцилиндрические концентраторы, отражатели и гелиостаты (зеркала) [4].

Солнечные электростанции содержат множество модулей. Как правило, модули закреплены на опорах с системами позиционирования. Оснащение солнечных модулей механизмами поворота и автоматизация процесса позиционирования модулей позволяют повысить эффективность СЭС.

В настоящее время солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ) находят все более широкое применение как источники энергии для средних и малых автономных потребителей, а иногда и для больших солнечных электростанций, работающих в энергосистемах параллельно с традиционными ТЭС, ГЭС и АЭС. Конструктивно СФЭУ обычно состоит из солнечных батарей в виде плоских прямоугольных поверхностей.

В 2012 г. американская компания Solar Janction сообщила о создании трехпереходного солнечного элемента, в котором в нижнем элементе Ge заменен переходом на основе соединения GaInNaAs(Sb). При 500-кратной концентрации СЭ имел подтвержденный КПД 43,5% – абсолютный рекорд для любых СЭ.

В качестве физической основы фотоэлектрического преобразования солнечной энергии при-

нимается фотовольтаический эффект в полупроводниках, хотя существуют и так называемые прямые методы преобразования солнечной энергии в электрическую: термоэлектрический, термофотоэлектрический, фотоэлектрохимический и т. д., которые, однако, не получили широкого практического распространения [5]. Используемая в настоящее время классическая модель фотопреобразователя с p-n-переходом дает следующую вольт-амперную характеристику (зависимость напряжения U от тока J, A/cm^2):

$$U = \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{\left(J_{\Phi} - J \right)}{J_0} + 1 \right] - JR, \tag{1}$$

где k — постоянная Больцмана; T [K] — рабочая температура фотопреобразователя; q — заряд электрона; J_{Φ} [A/cm^2] — фототок, пропорциональный интенсивности СИ падающего на поверхность фотопреобразователя; J_0 [A/cm^2] — обратный ток насыщения, определяемый свойствами исходного полупроводника и технологией изготовления фотопреобразователя; R — внутреннее электрическое сопротивление, препятствующее протеканию тока в структуре фотопреобразователя и через контакты с токоотводами.

Существуют два типа фотоэлектрических установок.

Автономные солнечные фотоэлектрические установки, в составе которых имеется система аккумулирования энергии (например, свинцовокислотные, литий-ионные и др. аккумуляторы). Далее электроэнергия может быть подана напрямую или преобразована в переменный ток в зависимости от типа нагрузки (рис. 2, a) [7].

Сетевые солнечные фотоэлектростанции, которые передают энергию в локальную/центральную электрическую сеть. Обязательным является наличие инвертера для последующей передачи в сети переменного тока. Обычно часть произведенной энергии используется для покрытия местной нагрузки, а в сеть передается избыток электроэнергии (рис. 2, δ).

По мощности фотоэлектрические установки классифицируют следующим образом.

Автономные установки очень малой мощности (до 1 кВт). Они используются для зарядки портативных электроприборов, уличного освещения и т. д. Автономные установки очень малой мощности (1–100 кВт) применяются в случае необходимости обеспечения электроэнергией удаленных объектов, таких как радиовышки, метеостанции, насосные станции.

Сетевые/смешанные установки малой и средней мощности (100–1000 кВт). Сетевые станции большой мощности (более 1000 кВт), которые выдают электроэнергию в сеть центрального электроснабжения [6].

В мировой практике из «солнечных» технологий наибольшее развитие получили два направ-

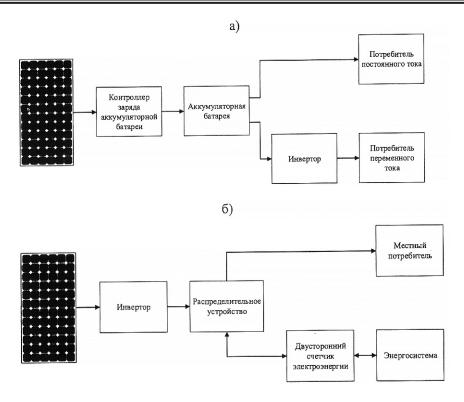


Рис. 2. Автономные солнечные фотоэлектрические установки:

а — фотоэлектрические установки, работающие напрямую и с инвертором;

б — фотоэлектростанции, передающие энергию в локальную/центральную электрическую сеть

ления, претендующие на использование в будущем:

- фотоэлектрическое PV (Photovoltaic Solar Power);
- концентрационное CSP (Concentrated Solar Power).

PV-электроустановки получают преимущественное распространение на территориях со среднегодовым приходом солнечной радиации $900...1500~\mathrm{kBt}~\mathrm{ч/m^2}.~\mathrm{K}$ таким территориям относятся большая часть Европы и значительная часть России.

CSP-технологии основаны на нагреве высокотемпературного теплоносителя концентрированным солнечным излучением с последующим использованием паротурбинных установок для выработки электроэнергии.

Солнечная энергия на Земле используется с помощью солнечных энергетических установок (СЭУ), которые можно классифицировать и по следующим признакам:

- по виду преобразования солнечной энергии
 в другие виды энергии тепло или электричество:
- по концентрированию энергии с концентраторами и без концентраторов;
- по технической сложности простые (нагрев воды, сушилки, нагревательные печи, опреснители и т. п.) и сложные.

Сложные СЭУ можно разделить на два подвида. Первый базируется в основном на системе преобразования солнечного излучения (СИ)

в тепло, которое далее чаще всего используется в обычных схемах тепловых электростанций. К ним относятся: башенные СЭС, солнечные пруды, СЭУ с параболоцилиндрическими концентраторами. Сюда же относятся и солнечные коллекторы, в которых происходит нагрев воды с помощью СИ.

Второй подвид СЭУ базируется на прямом преобразовании СИ в электроэнергию с помощью солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ). Сопоставление энергетических путей преобразования солнечной энергии показывает, что термодинамический путь предполагает необходимость трансформации лучистой энергии сначала в тепловую, а затем в механическую и электрическую, что неизбежно связано с дополнительными потерями. Поэтому наиболее эффективное направление развития солнечной электроэнергетики — это создание энергетических установок и станций на основе преобразования солнечной энергии в электрическую [7].

Солнечные батареи нашли широкое применение не только на земле, но и в космической технике. Ими оборудованы практически все космические аппараты. Все электрообеспечение МКС осуществляется от бортовых солнечных установок.

Поскольку солнечные фотоэлектрические батареи производят электроэнергию только в течение светового дня, а график потребления энергии круглосуточный, фотоэлектрические батареи объединяются с системами преобразования,

аккумулирования и коммутирования энергии в два типа фотоэлектрических установок.

Выработка ФЭУ из-за стохастического характера поступления солнечного излучения сильно изменяется в течение дня, поэтому чтобы понизить перепады тока, напряжения и частоты в сети в состав ФЭУ добавляют регуляторы тока, понижающие преобразователи, элементы защиты сети и т. д. Однако основным преимуществом сетевых станций является отсутствие необходимости в оборудовании, обеспечивающем аккумулирование энергии. Существуют также смешанные системы, в которых реализовано как подключение к сети, так и работа с аккумулирующими системами.

В настоящее время в солнечной энергетике коммерчески развиваются технологии создания солнечных элементов на основе использования монокристаллического кремния, тонкопленочные технологии с различными полупроводниками и каскадные многослойные структуры.

Чрезвычайно важным преимуществом гетероструктурных ФЭП на основе соединений GaInP/GaAs/Ge является их способность эффективно преобразовывать высококонцентрированное солнечное излучение. Это позволяет уменьшить расход полупроводниковых материалов пропорционально кратности концентрирования и, как следствие, существенно снизить стоимость вырабатываемой «солнечной» электроэнергии. Большое достоинство гетероструктурных ФЭП – их высокая температурная устойчивость.

Основными достоинствами ФЭУ являются:

- сравнительная простота в изготовлении;
- долговечность;
- отсутствие механических потерь в процессе преобразования энергии;
 - простота в обслуживании;
- исключение загрязнения при эксплуатации окружающей среды вредными выбросами.

Главный принципиальный недостаток всей солнечной энергетики — зависимость вырабатываемой энергии от времени суток, погодных условий и сезона. Чтобы обеспечить потребителя постоянным энергоснабжением, в состав автономных ФЭС необходимо включать аккумуляторы или резервные генераторы. А использование в существующих энергосетях большого количества крупных ФЭС вообще невозможно. Общая мощность ФЭС не может превышать 20% мощности всей энергосети.

Второй серьезный недостаток — низкая плотность потока солнечного излучения — приводит к необходимости собирать солнечную энергию с больших площадей. Поэтому крупные ФЭС требуют обширных территорий — 2,5—3,0 га/ (МВт мощности), так что там, где высока стоимость земли, найти площадку для строительства ФЭС не просто.

Третий недостаток – стоимость получаемой энергии выше, чем в традиционной энергетике [8].

Основные научные проблемы, которые требуют решения в области фотоэнергетики, можно изложить следующим образом [1].

- 1. Необходимость дальнейшего повышения КПД для сокращения площади полей ФЭП в связи с ростом стоимости земельных участков, которые требуется отчуждать под СЭС. В настоящее время для СЭС мощностью 1 МВт требуется, в зависимости от реальных значений КПД (14–25%), от 1,5 до 2,5 га земли. Для тепловых и атомных станций требуются аналогичные площади, если учитывать пруды-охладители конденсаторов этих электростанций и зоны отчуждения. Чтобы получить более существенные преимущества для СЭС в сравнении с ТЭС, АЭС и ГЭС, необходимо стремиться к повышению КПД до 30–40% без удорожания ФЭП, для этого есть определенные предпосылки [1].
- 2. Повышение долговечности $\Phi \partial \Pi$ со снижением деградации их характеристик не более чем до 3-5% за 30-50 лет работы (сегодня -15-20%). Такая возможность существует, если исключить применение, например, тедларовых пленок для упаковки и герметизации $\Phi \partial \Pi$, заменив их стеклом.
- 3. Решение вопросов очистки фронтальной поверхности ФЭП от загрязнений: мойка больших поверхностей полей ФЭП на крупных СЭС весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс.
- 4. Повышение эффективности работы ФЭП при низкой интенсивности светового потока (в пасмурные дни, в утренние и вечерние часы и т. п.).
- 5. Снижение зависимости параметров ФЭП от изменений температуры окружающего воздуха (снижение потерь мощности при повышенных температурах) [1].

В 2016 г. в 22 государствах мира мощность введенных в эксплуатацию солнечных электростанций превысила 100 МВт, а общий объем ввода мощностей составил 76,1 тыс. МВт (по сравнению с 51,2 тыс. МВт годом ранее) [3].

Беспрецедентным лидером «солнечного ралли» стал Китай (34,2 тыс. МВт, что на 19,8 тыс. МВт больше, чем в 2015 году). В США введено в работу 14,6 тыс. МВт (+6,2 тыс. МВт по отношению к 2015 г.). Существенный рост произошел также в Индии (4,5 тыс. МВт, на 2,6 тыс. МВт больше, чем в 2015-м).

В Европейском союзе (6,9 тыс. МВт) и Японии (8,6 тыс. МВт) наблюдается снижение объемов ввода мощностей (-1,7 и 0,4 тыс. МВт соответственно). В остальных регионах мира введено в эксплуатацию 7,3 тыс. МВт, то есть около 10% от суммарного ввода мощности в 2016 г.

Рост производства электрической энергии солнечными электростанциями в США позво-

лил снизить выбросы CO_2 на более чем 52 млн тонн [3], [12]. Существует закономерность. Все страны, которые активно развивают технологии и промышленность, развивают и ВИЭ. В какойто степени развитие возобновляемой энергетики — синоним промышленного развития, технологичности и экономической успешности государства. Независимо от ресурсной составляющей.

Китай завершил строительство крупнейшей в мире плавучей СЭС, которая уже подключена к энергосистеме страны. Она расположена на затопленном карьере, оставшемся от угледобычи, на юге китайской провинции Аньхой. Мощность станции составляет 40 МВт.

Плавучие электростанции становятся все более популярными в мире, поскольку их можно размещать на «бесполезных» территориях. Кроме того, размещение электростанции на воде позволяет снизить уровень испарения воды и одновременно обеспечить охлаждение элементов батарей, что предотвращает их преждевременный износ [13].

В Сингапуре в настоящее время начата реализация перспективного проекта по развитию возобновляемой энергетики. Среднегодовое солнечное излучение превышает 1500 кВт ч/м². Проект, состоящий из двух этапов, реализуют Национальный университет (National University of Singapor, NUS) и Сингапурский институт исследования солнечной энергетики (Solar Energy Research Institute of Singapore).

Ранее проведенные исследования показали, что вследствие эффекта естественного охлаждения повышается эффективность работы солнечных панелей. Кроме того, поверхность воды отражает солнечное излучение, что также позволяет увеличить эффективность.

Реализованные пилотные проекты продемонстрировали, что плавучая СЭС может вырабатывать ~ на 60% больше электрической энергии, чем аналогичная, установленная на суше [14, 15].

Итальянский энергоконцерн Enel через свою мексиканскую дочернюю компанию Enel Green Power Mexico приступил к строительству нового солнечного парка Villanueva установленной мощностью 754 МВт. Объект будет располагаться в штате Коауила на севере страны. Villanueva станет самым масштабным солнечным парком западного полушария и крупнейшим солнечным парком Enel в мире [16].

В [17] представлены теоретические и экспериментальные исследования распространения светового излучения в тонкопленочных солнечных элементах на основе кремния с текстурированными поверхностями. КПД на основе аморфного кремния с мультимасштабной текстурой значительно превышает КПД СЭ на подложках с наномасштабной текстурой. За счет мультимасштаб-

ного текстурирования плотность тока короткого замыкания увеличилась на 1,3 мА/см². В результате получили СЭС с плотностью тока короткого замыкания 16,8 мА/см² и КПД 10,7% [17]. Информацию о создании крупногабаритных тонкопленочных солнечных элементов на основе CuIn, $Ga_{1-x}Se_2$ можно почерпнуть в [18].

В России существуют вполне приемлемые условия для использования солнечной энергии практически на всей территории [1]. Но наиболее благоприятными являются условия солнечной радиации на юге европейской части России, на Алтае, на юге и востоке Сибири, на Дальнем Востоке.

По данным Института энергетической стратегии, теоретический потенциал солнечной энергетики в России составляет более 2300 млрд ту.т., экономический потенциал — 12,5 млн ту.т. То есть потенциал солнечной энергии, поступающей на территорию России в течение трех дней, превышает объем всего годового производства электроэнергии в нашей стране [1].

Ввиду расположения России между 41 и 82° с. ш. уровень солнечной радиации на территории РФ варьируется: от 810 кВтч/(м²·год) в отдаленных северных районах до 1400 кВтч/(м²·год) в южных районах. На уровень солнечной радиации оказывают влияние и значительные сезонные колебания. Например, на широте Москвы (55° с. ш.) дневное поступление солнечной радиации в январе составляет 1,69 кВт·ч/м², в июле — 11,41 кВт·ч/м². Вместе с тем при освоенных параметрах серийных ФЭП и их низкой стоимости в России на широтах вплоть до 50—55 с.ш. стало уже возможным сооружение рентабельных ФЭС.

В настоящее время наиболее активной организацией в сфере российской фотоэнергетики является группа компаний ООО «ХЕВЕЛ», созданная в 2009 г., открывшая собственное производство ФЭП в г. Новочебоксарске (Чувашия) с годовым объемом выпуска до 100 МВт и строящая совместно с дочерней компанией ООО «Авелар Солар Технолоджи» ряд крупных фотоэлектрических станций в России.

Внедренная на заводе «Хевел» в Новочебоксарске гетероструктурная технология в мировой практике относится к новому поколению кремниевых солнечных элементов, отличающихся наиболее высоким КПД ячейки — более 22% и широким температурным диапазоном использования.

В 2017 г. «Хевел» (совместное предприятие ГК «Ренова и АО «Роснано») ввела в эксплуатацию четвертую солнечную электростанцию в Оренбургской области — Соль-Илецкую СЭС мощностью 25 МВт.

Таким образом, установленная мощность объектов генерации на территории Оренбургской области составила 50 МВт, а общая мощность всех построенных «Хевел» СЭС достигла 100

МВт. Соль-Илецкая СЭС построена на солнечных модулях, произведенных на заводе в Новочебоксарске. Все вспомогательное оборудование также поставлено российскими предприятиями электротехнической и металлообрабатывающей промышленности. Таким образом, это крупнейшая станция в России с подтвержденным уровнем локализации 100%.

Завершились предпусковые испытания на Орской СЭС, сооружаемой ПАО «Т Плюс» в Оренбургской области. На площадке Орской фотоэлектрической станции завершены строительномонтажные и пусконаладочные работы. Проведены все виды испытаний. В ходе комплексного опробования двух очередей расширения достигнуты максимальные значения выдаваемой мощности в сеть — 8,1 и 4,7 МВт соответственно. Степень локализации (доли российского оборудования, применяемого в строительстве и работе) новых очередей солнечной станции составляет 70%. Суммарная мощность Орской СЭС после расширения составит 40 МВт.

Орская СЭС — не единственный проект группы «Т Плюс» в области альтернативной энергетики в данном регионе: в ближайшие годы солнечные станции появятся в Новосергиевке (45 МВт) и Сорочинске (60 МВт). В настоящее время идут проектно-изыскательские работы, ведется подготовка к проведению торгово-закупочных процедур для выбора поставщиков основного оборудования и подрядных организаций.

Построены и действуют солнечные электростанции: Кош-Агачская СЭС мощностью 10 МВт; Бурибаевская СЭС мощностью 10 МВт; Орская СЭС мощностью 25 МВт; Бугульчанская СЭС мощностью 5 МВт; Абаканская СЭС мощностью 5 МВт; Переволоцкая СЭС мощностью 5 МВт.

Объем выработки Переволоцкой СЭС с ноября 2015 г. превысил 7000 МВт/ч. В феврале 2017 г. были введены в эксплуатацию Плешановская и Грачевская СЭС мощностью 10 МВт каждая.

До 2019 г. группа компаний «Хевел» планирует построить еще 5 СЭС в Оренбургской области: в Переволоцком, Александровском, Саракташском, Домбаровском и Оренбургском районах. После реализации проектов общая мощность объектов солнечной генерации на территории региона достигнет 140 МВт.

В стадии строительства находятся: вторая очередь Бугульчанской СЭС мощностью 15 МВт; вторая очередь Бурибаевской СЭС мощностью 10 МВт; Исянгуловская СЭС мощностью 9 МВт; Первомайская СЭС мощностью 5 МВт; Усть-Канская СЭС мощностью 5 МВт [1]. В этом году на Алтае введена в эксплуатацию Онгудайская СЭС мощностью 5 МВт.

Планируется, что к 2019 г. общая установленная мощность солнечной генерации в Республике Алтай достигнет 90 МВт. Соответствующая договоренность была закреплена в соглаше-

нии между правительством Республики Алтай и группой компаний «Хевел», подписанном в рамках Петербургского международного экономического форума в 2016 г.

Фотоэлектрические модули компании «Хевел» успешно прошли экологическую сертификацию в системе «Листок жизни» [20]. Это первый случай в отечественной практике, когда солнечные модули получают экомаркировку международного уровня. Сейчас в стране работают уже 12 солнечных электростанций, построенных компанией «Хевел».

Солнечные панели пользуются популярностью по всему миру, так как являются сравнительно доступной и экологичной технологией производства энергии. Однако за выпуском любого (пусть даже «зеленого») продукта всегда стоит сложный процесс производства, который оказывает влияние на окружающую среду. В случае с фотоэлектрическими модулями отдельного внимания заслуживают вопросы изготовления кремниевых пластин (которые образуют ячейки модуля) и утилизация панелей по истечении срока службы. Учесть влияние этих и других аспектов позволяет экологическая сертификация по жизненному циклу.

Ранее в отечественной практике не существовало экологических стандартов, которые могли бы оценить нанотехнологическую продукцию с точки зрения экологической безопасности. В связи с этим НП «Экологический союз» и фонд инфраструктурных и образовательных программ решили объединить усилия и разработать «зеленые» стандарты, устанавливающие экологически ориентированные показатели с учетом жизненного цикла продукта.

Первым результатом совместной работы стало появление в системе «Листок жизни» комплексного стандарта СТО-56171713-017-2017 («Модули фотоэлектрические. Требования экологической безопасности и методы оценки»). Он включает в себя требования к безопасности сырьевых компонентов, контролю поставщиков, сокращению количества отходов, соблюдению природоохранного законодательства.

Стоит отметить, что вопрос грамотной утилизации фотоэлектрических модулей и других комплектующих солнечных панелей до сих пор не решен не только в России, но и в мире. Однако новый отечественный стандарт позволяет приблизиться к решению этой проблемы за счет включения требований по установке, правильной эксплуатации и утилизации отходов с минимальными токсичными показателями, которые действуют не только для производителя, но и для поставщиков.

По итогам проверок, которые проводили специалисты НП «Экологический союз» и Экологического центра (АНО «Наносертифика»), было подтверждено соответствие продукции всем ка-

чественным и экологическим требованиям стандарта в системах «Листок жизни», а также «Наносертифика» [20].

Решается вопрос с инвестициями для строительства ряда СЭС, по которым технико-экономические обоснования выполнил институт «Ростовтеплоэлектропроект»: СЭС-1 мощностью 13 МВт и СЭС-2 мощностью 120 МВт в окрестностях Кисловодска в Ставропольском крае; СЭС мощностью 30—50 МВт в Темрюкском районе Краснодарского края.

В энергетику России включен Крымский комплекс фотоэлектрических СЭС суммарной мощностью около 400 МВт (СЭС в п. Перово – 106 МВт, в п. Охотниково – 80 МВт, в п. Митяево – 40 МВт и др.) – крупнейший по мировым масштабам блок СЭС, построенный там австрийской фирмой Active Solar по контракту с Украиной – до перехода Крыма в российскую юрисдикцию [1].

В 2011 году в России была создана Ассоциация солнечной энергетики [21]. Ее основная задача - популяризация солнечной энергетики в стране и создание механизмов, стимулирующих ее развитие. До 2012 года у нас в стране было крайне узкое представление об этой отрасли, несмотря на то что во многих странах она к тому времени была достаточно хорошо развита. В Ассоциации оценили перспективы солнечной генерации в России и донесли информацию до соответствующих органов. В результате появилась поддержка со стороны правительства [21]. В Ассоциацию входят производители солнечных модулей и компонентов для солнечных электростанций, компании - представители инжинирингового и строительного секторов, прежде работавшие в традиционной генерации, а также научные организации, занимающиеся разработками в области солнечной энергетики.

Как известно, по решению правительства РФ до 2024 года в России должно быть построено в общей сложности 1,5 ГВт солнечной генерации. В данном случае речь идет о большой сетевой генерации, проектах мощностью от 5 до 25 МВт. Другой важный сегмент — автономная гибридная генерация, экономически эффективная в районах с изолированным энергоснабжением. Потенциал данного сегмента дополнительно к сетевой генерации оценивается в 500 МВт солнечной энергии.

Сегодня более 20 млн россиян живут на территориях с изолированным энергоснабжением – речь идет о небольших поселках и районах с населением около двухсот-трехсот человек, куда экономически неэффективно тянуть линии электропередачи. Выходом из сложившейся ситуации может стать строительство автономной гибридной генерации на базе существующей дизельной электростанции, куда встраиваются солнечные модули и накопители энергии.

В России уже есть примеры дизель-солнечных энергоустановок: одна из первых мощностью порядка 100 кВт построена шесть лет назад в поселке Яйлю Республики Алтай, она достаточно эффективна, круглосуточно обеспечивает электричеством жителей поселка.

Еще один проект недавно реализован на южной границе России, в селе Менза Забайкальского края: гибридная энергоустановка оборудована солнечными модулями общей мощностью 120 кВт, двумя дизельными генераторами по 200 кВт каждый и аккумуляторной батареей емкостью 300 кВт/ч. Также в составе установки система накопления и хранения энергии.

Реализация этого проекта позволит не только обеспечить бесперебойным электричеством порядка двухсот жителей поселка, но и на 50% снизить потребление дизельного топлива, что выгодно для регионального бюджета, субсидирующего дизельную генерацию.

По словам директора Ассоциации предприятий солнечной энергетики России Антона Усачева, возможность реализации подобных проектов в максимально короткие сроки — одно из преимуществ солнечной энергетики, и успешный опыт Забайкалья может послужить примером для других регионов.

Экономическая целесообразность таких проектов складывается из двух факторов: экономической эффективности для местного бюджета — регион передает дизельную электростанцию в концессию в рамках государственно-частного партнерства инвестору, готовому заниматься ее обслуживанием, дополнять солнечными панелями и системами хранения энергии; и для самого инвестора — сроки окупаемости подобных проектов достаточно короткие, до семи лет.

Кроме бытовых потребителей можно выделить еще одну группу потребителей - промышленный сектор. Например, в энергодефицитных районах Республики Башкортостан дополнительные мощности можно наращивать за счет солнечной генерации, что, в свою очередь, открывает возможности для развития промышленных производств. В Республике Алтай, прежде зависимой от энергоперетоков из других регионов, тоже есть планы по развитию промышленного сектора: его создание станет возможным благодаря строительству здесь собственной солнечной генерации. Алтай - пока единственный пример в России создания кластера, полностью состоящего из генерации на возобновляемых источниках энергии. Это, кстати, уникальная практика не только в нашей стране, но и в мире.

На данный момент существуют две проблемы развития солнечной энергетики в нашей стране. Основная проблема связана с высокой стоимостью заемного капитала. По расчетам снижение заемного капитала на восемь процентов приведет к двукратному сокращению стоимости ко-

нечной электроэнергии солнечных электростанций.

Вторая проблема связана с недостаточной популяризацией солнечной энергетики в регионах с высоким уровнем дизельной генерации, износ которой достигает 70–80%.

Солнечные установки, используемые сейчас в России, статичны, не оснащены системами слежения за солнцем. В Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана имеются пилотные разработки трекинговых систем, позволяющих следить за изменением положения Солнца и, соответственно, получать больше энергии [21].

Отрасль солнечной энергетики характеризуется высоким уровнем конкуренции в стоимости и технологиях. В России лидерами по объему установленной мощности солнечной генерации стали регионы, которые в свое время приложили много усилий, привлекая на свои территории инвесторов для реализации различных проектов. Среди лидеров: Республика Алтай, Республика Башкортостан, Оренбургская область. Вслед за ними подтянутся Забайкальский край и Бурятия, Ставропольский край, Самарская и Саратовская области. У автономной гибридной генерации достаточно большой экспортный потенциал [21].

В Майминском районе Республики Алтай введена в эксплуатацию первая СЭС, построенная на гетероструктурных модулях российского производства [22]. В результате Россия стала одной из всего трех стран (наряду с Японией и Южной Кореей), использующих технологию гетероперехода в промышленных масштабах. На 2015 г. суммарная установленная мощность всех СЭС в составе «РАО ЭС Востока» составила 1285 кВт. Экономия топлива вследствие замещения выработки ДЭС солнечными электростанциями в 2016 г. достигнет 408 тонн, что эквивалентно 18,4 млн рублей [23].

В селе Юнкор Верхоянского района Якутии АО «Сахаэнерго» запустило новую автомотизированную дизельную электростанцию мощностью 624 кВт и солнечную электростанцию мощностью 40 кВт [24]. Планируемая мощность СЭС составит 42 тысячи кВт в год. Согласно прогнозам специалистов, использование новой СЭС позволит ежегодно экономить до 15,5 тонн дизельного топлива и около 2 млн рублей в год [24, 25].

Федеральной службой по интеллектуальной собственности выдан авторам патент на изобретение отечественной черепицы [26]. Проект «Солнечные кровли России» получил окончательное подтверждение теоретических изысканий разработчиков (директор ВИЭСХ профессор Д. С. Стребков, директор ООО «Инноватикс» А. И. Кирсанов).

На рассмотрении в «Роспатенте» находится еще одно изобретение авторов – солнечная чере-

пица, которая одновременно будет генерировать электричество и выдавать горячую воду. Причем отечественные кровельные изделия в 3–4 раза дешевле зарубежных аналогичных товаров, а по качеству превосходят их. Отечественные разработчики оценивают данные изобретения в плане импортозамещения и возможности использования в муниципальных, региональных, федеральных программах повышения энергоэффективности и энергосбережения, что позволит значительно снизить бюджетные расходы на всех уровнях. В настоящее время под Анапой создано опытное производство по изготовлению первых партий [26].

Если подвести итоги, то к самым очевидным плюсам автономного энергоснабжения относится отсутствие платы за электроэнергию. Это несомненная экономия, однако к этому плюсу прилагается и минус: для устройства автономного энергоснабжения требуется не бесплатное оборудование. Причем речь идет не только о стоимости самого оборудования, но и о расходах на его эксплуатацию. Поэтому, выбирая приборы и материалы, которые будут обеспечивать «энергоавтономию», следует тщательно производить расчеты, чтобы не оказалось, что оборудование выйдет из строя раньше, чем успеет окупиться.

Энергообеспечение зависит только от вас. Не приходится опасаться аварий на сетях и прочих неприятностей. Так что главный плюс полной автономии энергоснабжения — абсолютная независимость. Кроме того, сейчас достаточно технических решений, чтобы решить вопрос автономного энергоснабжения легко и именно так, как выгодно на данном конкретном месте [29].

Библиографический список

- 1. Батенин В. М., Зайченко В. М., Леонтьев А. И., Чернявский А. А. Концепция развития распределенной энергетики в России // Энергетика. 2017. № 1. С. 1–18.
- 2. Зайченко В. М., Чернявский А. А. Автономные системы энергоснабжения. М.: Недра. 2015. 285 с.
- 3. *Могиленко А*. Солнечная энергетика в 2016 г. Дальнейший рост // Энергетика и промышленность России. 2017. № 6. С. 42.
- 4. Капля Е. В. Энергоэффективное терминальное управление сервоприводами модулей солнечной электростанции // Электротехника. 2017. \mathbb{N} 1. С. 76–80.
- 5. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / под общ. ред. П. П. Безруких. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
- 6. Основы современной энергетики: курс лекций для менеджеров энергетических компаний.

- Ч. 2. Современная элетроэнергетика / под ред. А. П. Бурмана и В. А. Строева. М.: Издательство МЭИ. 2003. 454 с.
- 7. *Елистратов В. В.* Возобновляемая энергетика. 3-е изд., доп. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2016. 424 с.
- 8. Оршанский И. С. Фотоэнергетика: достоинства, недостатки, направления развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2013. \mathbb{N} 8. С. 13–19.
- 9. Жалнин Б. В., Каган М. Б., Наумов А. В., Плеханов С. И. О развитии фотоэлектропреобразователей на основе соединений GaInP/GaAs/Ge. // Энергия: экономика, техника, экология. 2014. № 1. С. 42–48.
 - 10. Поиск. 2017. № 15. С. 4
- 11. Фотовольтаический эффект и подвижность носителей заряда в слоях композиции сополимера битиофена или ротаксана на его основе и производного фуллерена С70 / С. В. Костромин, В. В. Малов, А. Р. Тамеев и др. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 3. С. 72–79.
- 12. Усачев А. Альтернативная энергетика в мире уже давно не является альтернативной // Энергетика и промышленность России. 2017. № 13-14. С. 31.
- 13. Крупнейшая плавучая солнечная электростанция // Энергетика и промышленность России. 2017. № 11–12. С. 50.
- 14. *Могиленко А.* Проект плавучей солнечной электростанции // Энергетика и промышленность России. 2017. \mathbb{N} 15–16. С. 43.
- 15. *Могиленко А*. Крупный проект в возобновляемой энергетике // Энергетика и промышленность России. 2017. № 11–12. С. 51.
- 16. Крупнейший солнечный парк западного полушария // Энергетика и промышленность России. 2017. № 8. С. 41.
- 17. Tamang A., Hongsingthong A., Sichanugrist P. On the potential of light trapping in

- multyscale texture thin film solar cells $/\!/$ Sol. Energy Mater. and Sol. Cells. 2016. 144. P. 300–308.
- 18. Создание крупногабаритных тонкопленочных солнечных элементов на основе CuIn, Ga1-xSe2. Ч. 2. // Sol. Energy. 2016. 129. С. 116–125.
- 19. Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учеб. пособие / пер. с англ.; под ред. С. П. Малышенко, О. С. Попеля. Долгопрудный: ИД «Интеллект»; М.: ИД МЭИ. 2010. 704 с.
- 20. *Смольянинов И*. Солнечные панели впервые получили экомаркировку. // Энергетика и промышленность России. 2017. № 15–16. С. 9.
- 21. *Усачев А*. Конвертировать специфику в преимущество // Энергетика и промышленность России. 2017. № 1–2. С. 2–3.
- 22. Глебов И. Первая СЭС нового поколения // Энергетика и промышленность России. 2017. \mathbb{N} 19. С. 8.
- 23. Новые СЭС в Якутии // Академия энергетики. 2015. № 6. С. 46.
- 24. В Якутии «работает» солнце // Академия энергетики. 2016. № 1. С. 50.
- 25. В Якутии будут построены три новые СЭС // Энергетика и промышленность России. 2017. № 13–14. С. 10.
- 26. Российская солнечная черепица // Академия энергетики. 2015. № 6. С. 44.
- 27. Развитие альтернативной энергетики выгодно // Академия энергетики. 2016. \mathbb{N} 1. C. 51.
- 28. Смольянинов И. Мощность объектов солнечной генерации под управлением группы «Хевел» достигла 100 МВт // Энергетика и промышленность России. 2017. № 11–12. С. 8.
- 29. *Канарейкин А*. Солнечная энергия для добычи нефти // Энергетика и промышленность России. 2015. № 17. С. 11.

УДК 621.33

С. Н. Трубенева*

старший преподаватель

А. В. Болтнева*

студентка

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

В статье представлены виды компенсирующих устройств. Представлен перспективный способ улучшения технических показателей синхронного компенсатора.

Ключевые слова: компенсирующее устройство, синхронный компенсатор, высокотемпературный сверхпроводник, седловидная обмотка.

S. N. Trubeneva*

Senior Lecturer

A. V. Boltneva*

Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

COMPENSATING DEVICE

The article presents the types of compensating devices. The perspective way of improvement of technical indicators of synchronous condenser is presented.

Keywords: compensating device, synchronous compensator, high-temperature superconductor, saddle winding.

В мировой практике все чаще встает вопрос об экономном использовании электроэнергии. Основным направлением является снижение потребления энергии при разработке и эксплуатации промышленных сетей высокого и низкого напряжения [1].

Работа системы электроснабжения характеризуется потреблением электроприемниками реактивной мощности. Это вызывает дополнительные потери энергии в элементах системы, снижение уровня напряжения и необходимость иметь повышенную пропускную способность подстанций и распределительных сетей, что снижает экономичность работы системы. В связи с этим для улучшения показателей работы системы электроснабжения необходимо производить компенсацию реактивной мощности.

Компенсировать реактивную мощность в электрической сети с помощью компенсирующих устройств (КУ) намного проще, чем уменьшать потребление активной мощности, поскольку для последней требуется изменение технологического режима работы потребителей электроэнергии, что не всегда возможно осуществить.

Практика такого производства реактивной энергии получила широкое распространение во всем мире и дает громадный экономический эффект [2].

Все компенсирующие устройства можно разделить на несколько видов (рис. 1).

Статические компенсаторы — это батареи конденсаторов и другие источники реактивной мощности, не имеющие вращающих частей.

Батареи конденсаторов (БК) бывают поперечной и продольной компенсаций.

Батареи конденсаторов поперечной компенсации устанавливаются в узлах нагрузки и служат для выдачи реактивной мощности, необходимой потребителям. Они собираются из отдельных конденсаторов путем параллельного и последовательного соединения для обеспечения необходимой реактивной мощности и напряжения соответственно.

В настоящее время БК поперечной компенсации применяются в сетях всех напряжений до 110 кВ включительно. Особенно распространены они в сетях промышленных предприятий.

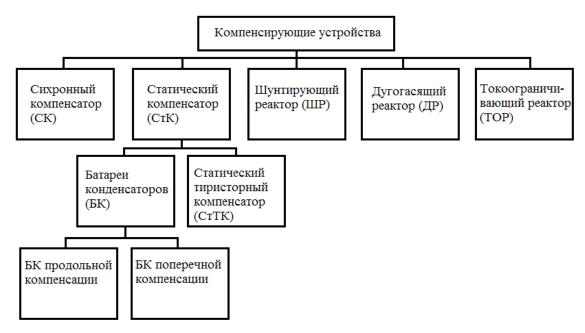


Рис. 1. Виды компенсирующих устройств

БК продольной компенсации применяются для уменьшения реактивного (индуктивного) сопротивления сети. Параметром, по которому они выбираются, является их емкостное сопротивление X_{κ} . Наложение его на индуктивное сопротивление сети X_c снижает результирующее сопротивление

$$X = X_c - X_{\kappa}$$

Батареи конденсаторов продольной компенсации рассматриваются как средства повышения предела передаваемой мощности в электропередачах высоких напряжений, которые обладают большими реактивными сопротивлениями. В некоторых случаях они применяются в распределительных сетях для снижения потери напряжения с целью обеспечения необходимых отклонений напряжения у потребителей.

Статические тиристорные компенсаторы (СТК) являются более совершенными компенсаторами, в которых осуществляется плавное регулирование тока. В установке применены нерегулируемые емкости (БК) С1, С2, С3, которые вырабатывают реактивную мощность (емкостную) Q_c , и регулируемая с помощью тиристорных ключей VS индуктивностью LR. Управляющие электроды тиристоров присоединены к схеме автоматического регулирования. Достоинствами этой установки являются отсутствие вращающихся частей, быстродействие и плавность регулирования (рис. 2).

Шунтирующие реакторы (ШР) могут только потреблять из сети реактивную мощность индуктивного характера, которая определяется формулой

$$Q_p = U^2 B_p,$$

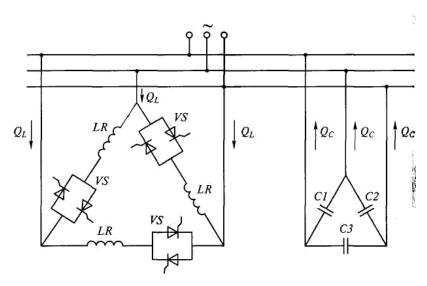


Рис. 2. Схема статических регулируемых компенсаторов

где $B_{\scriptscriptstyle p}$ – индуктивная проводимость реактора.

ШР применяются для потребления излишней зарядной мощности, линий электропередачи высоких классов напряжения. Они подключаются к началу ШР1 и концу ШР2, а иногда и в промежуточных точках длинных линий.

Для регулирования степени компенсации реактивной мощности целесообразно использовать управляемые реакторы, в которых специальными устройствами изменяют индуктивную проводимость.

Дугогасящий реактор — электрический аппарат, предназначенный для компенсации емкостных токов в электрических сетях с изолированной нейтралью, возникающих при однофазных замыканиях на землю. Применяются для заземления нейтрали трехфазных сетей 6—35 кВ. При замыкании на землю одной фазы реактор оказывается под фазным напряжении и через место замыкания протекает емкостной и индуктивный токи, которые компенсируют друг друга, и дуга в месте замыкания не возникает. Конструкция дугогасящего реактора похожа на конструкцию масленых трансформаторов и различается исполнением в магнитной системе.

Токоограничивающий реактор — электрический аппарат, предназначенный для ограничения ударного тока короткого замыкания. Включается последовательно в цепь, ток которой нужно ограничивать, и работает как индуктивное (реактивное) дополнительное сопротивление, уменьшающее ток и поддерживающее напряжение в сети при коротком замыкании, что увеличивает устойчивость генераторов и системы в целом.

При коротком замыкании ток в цепи значительно возрастает по сравнению с током нормального режима. В высоковольтных сетях токи короткого замыкания могут достигать таких величин, что подобрать установки, которые смогли бы выдержать электродинамические силы, возникающие вследствие протекания этих токов, не представляется возможным. Для ограничения тока короткого замыкания применяют токоограничивающие реакторы, которые при к. з. также поддерживают на сборных шинах питания достаточно высокое напряжение (за счет большего падения на самом реакторе), что необходимо для нормальной работы других нагрузок.

Синхронные компенсаторы представляют собой синхронные двигатели, работающие вхолостую без механической нагрузки. В зависимости от тока возбуждения они могут вырабатывать реактивную мощность или потреблять ее. В эксплуатации находятся синхронные компенсаторы мощностью до 160 МВА. Они установлены, как правило, на крупных районных подстанциях. Часть их подключена к обмотке низшего напряжения автотрансформаторов, которые потребляют значительную реактивную мощность.

Несмотря на большое количество видов компенсирующих устройств, наиболее широкое распространение получили статические и синхронные компенсаторы, каждый из которых имеет ряд достоинств и недостатков.

Статические компенсаторы реактивной мощности (СКРМ) являются одним из перспективных устройств оптимальной компенсации реактивной мощности на данный момент.

Достоинствами синхронных компенсаторов как источников реактивной мощности являются: положительный регулирующий эффект, который заключается в том, что при уменьшении напряжения в сети генерируемая мощность компенсатора увеличивается; возможность плавного и автоматического регулирования генерируемой реактивной мощности; достаточная термическая и электродинамическая стойкость обмоток компенсаторов во время КЗ; возможность восстановления поврежденных синхронных компенсаторов путем проведения ремонтных работ.

К недостаткам синхронных компенсаторов следует отнести удорожание и усложнение эксплуатации (сравнивая, например, с конденсаторными батареями) и значительный шум во время работы. Потери активной мощности в синхронных компенсаторах при их полной загрузке довольно значительны и в зависимости от номинальной мощности находятся в пределах от 0,011 до 0,03 кВт/кВАр. Удельная стоимость синхронных компенсаторов и потери активной мощности значительно увеличиваются при уменьшении их номинальной мощности; например, у синхронных компенсаторов мощностью 7,5 МВАр удельная стоимость, включая все расходы на установку, составляет 12,5, а у компенсаторов 75 МВАр для наружной установки 7,5 руб/кВАр.

Основные достоинства этих статических компенсаторов — высокое быстродействие, надежность работы и малые потери активной мощности.

Недостатком является необходимость установки дополнительного регулируемого дросселя.

Проектирование синхронных компенсаторов, как и любой другой машины, начинают с выбора главных размеров: внутреннего диаметра D и расчетной длины l_{δ} [3].

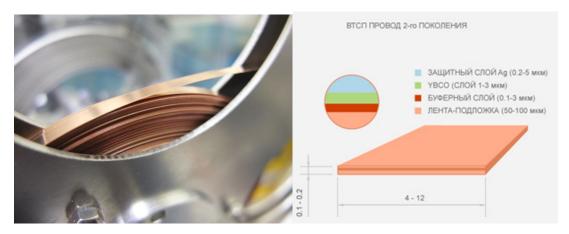
По рекомендациям, полученных на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации подобных машин, определяем значение внутреннего диаметра D:

$$D = \frac{D_A}{k_{ff}},$$

где D_A — предварительное значение внешнего диаметра статора; $k_{\mathcal{A}}$ — коэффициент, значение которого зависит от числа полюсов.

Получив значение D, находим расчетную длину:

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



Puc. 3. ВТСП-провод 2-го поколения

$$l_{\delta} = \frac{6.1 \cdot \dot{S_{H}}}{\alpha_{\delta} \cdot k_{B} \cdot k_{o61} \cdot A \cdot B_{\delta H} \cdot D^{2} \cdot n_{H}},$$

где α_{δ} – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_B – коэффициент формы поля; $k_{oб1}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора; D – внутренний диаметр статора; A – линейная нагрузка статора; $B_{\delta \mathrm{H}}$ – максимальное значение индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке.

Как α_{δ} , так и k_B зависят от размеров и конфигурации полюсного наконечника, а также воздушного зазора и полюсного деления. Линейную нагрузку A и индукцию $B_{\delta \mathrm{H}}$ выбирают по графику зависимости $A,\,B_{\delta \mathrm{H}}$ от $\tau,\,$ для синхронных машин определенной мощности. Данные значения следует рассматривать как предварительные, в дальнейшем расчете при необходимости их можно изменить. При этом следует отметить, что в зависимости от выбора A и $B_{\delta_{\mathrm{H}}}$ изменяется активный объем $D^2 \cdot l_\delta$ проектируемой машины. Чем больше произведение $AB_{\delta \mathrm{H}}$, тем меньше объем будет иметь машина. Однако при увеличении линейной нагрузки увеличиваются электрические потери, происходит нагрев обмотки. Допустимое значение зависит от нагревостойкости применяемой изоляции, а также от конструктивного выполнения машины. Индукция $B_{\delta ext{H}}$ ограничена насыщением магнитной цепи и в первую очередь насыщением зубцового слоя. Следует также отметить, что с увеличением от-

ношения $\frac{A}{B_{\delta^{_{\it{H}}}}}$ индуктивное сопротивление возрастает.

Для улучшения технических показателей вместо медного провода в обмотке можно использовать высокотемпературный сверхпроводниковый (ВТСП) провод 2-го поколения (рис. 3) [4], который имеет следующие параметры при температуре 77 К:

$$I_{\kappa p} = 100 - 150 A$$
,

$$J_{\kappa p} > 500 \, A \, / \, \text{Mm}^2$$
.

Данный провод представляет собой металлическую ленту, покрытую функциональными слоями, одним из которых является тонкий слой высокотемпературного сверхпроводника, благодаря которому энергия протекает без потерь. Однако готовые ленточные проводники являются очень чувствительными к растяжению и поэтому вследствие опасности потерь нагрузочной способности по току или, соответственно, плотности критического тока J_c позволяют производить гибку только в очень малой степени. В связи с этим необходимо исключить пазы в проектировании машины, улучшив кривую ЭДС, и использовать трековые катушки (рис. 4).

Катушки данного типа являются плоскими обмотками, в которых витки постоянно лежат внутри плоскости обмотки. Если такие катушки типа беговой дорожки накладывать друг на друга, то стопка в продольном направлении, таким образом, не имеет отверстия (так называемой «апертуры»). Во вращающихся машинах со сквозным валом трековые катушки должны устанавливаться выше и ниже центральной области. Поэтому в аксиально проходящих прямых участках катушечной обмотки получается свободное пространство, не занятое обмоткой, которое приводит к соответствующему сниже-

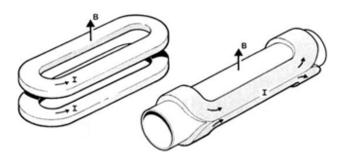


Рис. 4. Трековая катушка

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'2018

Основные значения при использовании ВТСП-обмотки

Основные параметры	Значение	Единицы измерения	
Номинальная полная мощность	5000	MB·A	
Номинальное линейное напряжение	6300	В	
Номинальная частота вращения	750	об/мин	
Номинальное фазное напряжение	3637	В	
Номинальный ток	481,125	A	
Номинальная магнитная индукция	0,6418	Тл	
Линейная нагрузка	4,8.104	А/м	
Диаметр расточки статора	1300	MM	
Активная длина статора	1328	MM	
Плотность тока в обмотке статора		A/mm^2	

нию полезной напряженности поля. За счет использования седловидных катушек, то есть катушечных обмоток с изогнутыми на торцовых сторонах вверх лобовыми частями обмотки, возникает апертура [5].

Использование ВТСП-обмотки и трековых катушек позволяет при тех же главных размерах увеличить номинальную мощность [6] (см. табл.).

Таким образом, синхронный компенсатор с ВТСП-обмоткой является наиболее выгодным компенсирующим устройством.

Библиографический список

1. *Москаленко В. В.* Автоматизированный электропривод. 1986.

- 2. Применение компенсирующих устройств в электрических сетях. URL: http://leg.co.ua/info/podstancii/primenenie-kompensiruyuschihustroystv-v-elektricheskih-setyah.html (дата обращения 15.02.18).
- 3. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин. 1980.
- 4. Высокотемпературный сверхпроводниковый проводник 2-го поколения (ВТСПлента). URL: https://innoprod.startbase.ru/products/27937/ (дата обращения 15.02.18).
- 5. Легисса Мартино, Прельсс Норберт. Седловидная катушечная обмотка с применением сверхпроводников и способ ее изготовления. 2006.
- 6. *Timofeyev S.* Modern Reactive Power Generators // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 313. 2018.

УДК 621.865.8

С. Н. Трубенева*

старший преподаватель

Н. Л. Гречкин*

студент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЕМ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА

Приведена разработанная модель модуля антропоморфного робота, анализ существующих моделей, а также рекомендации и основные этапы проектирования модуля.

Ключевые слова: модуль антропоморфного робота, кисть, модель.

S. N. Trubeneva*

Senior lecture

N. L. Grechkin*

Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM THE MODULE OF ANTHROPOMORPHOUS ROBOTIC

The article presents the developed model of an anthropomorphic robot module, analysis of existing models, as well as recommendations and the main stages of module design.

Keywords: module of anthropomorphic robot, brush, model.

С давних пор человечество мечтает воссоздать по своему подобию многофункциональный механизм — робота, который мог бы решать самые разные проблемы, возникающие во всевозможных отраслях общественной жизни людей. Актуальными решения человеческих проблем с помощью роботов являются по сей день. Современная робототехника достигла за сравнительно короткое время небывалых результатов, рынок постепенно заполняется новыми и оптимизированными мехатронными системами, и различными платформами для их разработки.

Говоря о бытовых роботах будущего, чаще всего предполагается, что они будут уметь делать все, что и их создатель-человек: начиная от приветственного рукопожатия и заканчивая игрой на музыкальных инструментах. Но чтобы достичь такой многофункциональности, важно понять и разобраться как возможно реализовать каждую функцию по отдельности. Определенных успехов удалось достичь ученым из разных стран.

В Пекине в рамках ежегодной конференции World Robot Conference выступил робот-музыкант Teo Tronico (рис. 1). 19-палый робот играет на клавишах и поет. Создатель робота – ита-

льянец Маттео Сузи. На разработку он потратил 4 года. За плечами робота, выступающего с 2012 г. – концерты во многих больших залах мира, в частности, в берлинской филармонии. Робот выступал также дуэтом с виртуозамилюдьми. Маттео обошлось создание такого робота ровно в 4700 долл. И это еще весьма бюджетный вариант. Ведь подобные разработки других изобретателей в сфере роботостроения стоят гораздо дороже [1].

На просторах Интернета не так много информации об аналогах подобного робота. Однако в интернет-магазине предлагают приобрести робота-пианиста, созданного из стекловолокна, смолы, а снаружи — из силиконовой резины (рис. 2) [2]. Размер такого механизма $2.5 \text{ м} \times 1.3 \text{ м} \times 1.8 \text{ м}$, а цена — $1\,900\,000$ руб. [2].

В китайском интернет-магазине продавец предлагает готовый вариант аналога модуля антропоморфного робота (рис. 3) [5]. Размер манипулятора — 25 см, вес — около 780 г. Основой механизма служат серводвигатели. Цена такой механической руки почти 9000 руб.

В Университете науки и технологий AGH, который находится в Кракове, студент Войцех Швитала разработал программу для промыш-



Puc. 1. Робот-музыкант Teo Tronico



Рис. 2. Робот-пианист



Рис. 3. Механическая рука

ленного робота *Mitsubishi* RV-2F-D (собственность университета) (рис. 4), реализующую нажатия клавиш фортепиано в определенной последовательности, т.е воспроизведения музыкальных произведений. Проект получил название «*Stanley*».

Суть программы достаточна проста: при нажатии мышью на виртуальные клавиши, робот дублирует заданные движения на настоящем инструменте. Проигранная мелодия сохраняется, а робот имеет возможность повторить ее самостоятельно.

Большими недостатками проекта, как отметил сам разработчик Войцех Швитала, являются медленная скорость отработки движений роботом, а также громкий шум двигателей.

Основными модулями промышленных и антропоморфных роботов являются захватные устройства. По принципу действия все захватные устройства принято делить на три группы: механические; вакуумные; магнитные (рис. 5). В приведенную классификацию дополнительно введены захватные устройства с эластичными камерами, которые относят к группе универсальных захватов, и прочие захватные устройства, к которым можно отнести, например, бесконтактные струйные и электростатические захваты.

По способу удержания объекта захватные устройства принято делить также на три групны: схватывающие, поддерживающие, удерживающие (рис. 6). Схватывающие захватные устройства удерживают объект благодаря кинематическому воздействию рабочих элементов (губок, пальцев, клещей) с помощью сил трения или комбинации сил трения и запирающих усилий.

Все схватывающие захватные устройства активного типа подразделяются на две группы: ме-



Puc. 4. Робот-пианист Stanley – промышленный робот Mitsubishi RV-2F-D



Рис. 5. Классификация захватных устройств по принципу действия

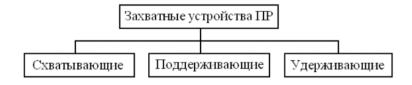


Рис. 6. Классификация захватных устройств по способу удержания объекта

ханические (клещи, тиски, шарнирные пальцы) и с эластичными рабочими камерами, деформирующимися под действием нагнетаемого внутрь сжатого воздуха или жидкости.

В поддерживающих захватных устройствах для удержания объекта используют нижнюю поверхность, выступающие части объекта или имеющиеся в его корпусе отверстия.

К таким захватным устройствам относят крюки, петли, вилки, лопатки и захваты питателей, не зажимающие заготовок. Удерживающие захватные устройства обеспечивают силовое воздействие на объект благодаря использованию различных физических эффектов. Наиболее распространены вакуумные и магнитные захватные устройства. Реже встречаются захватные устройства, использующие эффект электростатического притяжения, адгезии и др.

Мы живем в мире, удивительные явления которого не перестают удивлять ни одно поколение людей. Одним из таких удивительных явлений является сам человек — необычайный механизм

с высокой точностью и эффективностью. Тело человека имеет в своем составе динамичную структуру костей и хрящей, называемую скелетом. Скелет человека сложен в строении, гибок, с соединениями и суставами, предназначение которых —осуществление движения. Одним из опорно-двигательных аппаратов в скелете человека является кисть.

Кисть человека имеет три отдела: запястье, пясть и пальцы (рис. 7).

В отделе запястья находится восемь мелких костей неправильной формы.

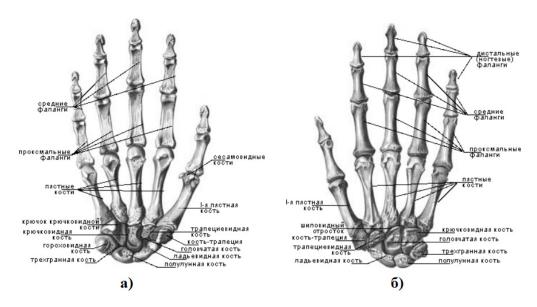
В отделе пясти находится пять трубчатых костей, которые сочленяются с проксимальными фалангами пальцев. Каждый палец, кроме первого состоит из трех фаланг: проксимальной, средней, дистальной. Первый палец имеет две фаланги: проксимальную и дистальную. В отделе пальцев в сумме находится четырнадцать фаланг разных длин и форм.

Связочный аппарат кисти состоит из лучезапястного, запястно-пястных, пястно-фаланговых и межфаланговых суставов (рис. 8). В лучезапястном суставе возможны сгибание и разгибание, отведение и приведение кисти, а также движение вращательного характера на 10–12 град. Вращательное движение происходит за счет эластичного хряща в суставе. При сгибании кисти общий объем подвижности достигает 85 град., приведение – 40 град., отведение – 20 град. Запястно-пястные суставы, кроме запястно-пястного сустава большого пальца, имеют плоскую форму и малоподвижны. Объем движений составляет от 5 до 10 град.

Запястно-пястный сустав большого пальца кисти образован многоугольной костью и основанием первой пястной кости. Суставные поверхности имеют седловидную форму. В суставе

возможны следующие движения: приведение и отведение, противопоставление и обратное движение, а также круговое движение. Благодаря противопоставлению большого пальца всем остальным пальцам значительно возрастает объем хватательных движений кисти. Величина подвижности в запястно-пястном суставе большого пальца составляет $45-60^\circ$ при отведении и приведении и $35-40^\circ$ при противопоставлении и обратном движении.

Движения кистями рук были бы невозможны без участия мышц (рис. 9). Мышцы кисти обеспечивают координированность, четкость и силу движений. Мышечный аппарат этого участка тела состоит из большого количества отдельных мышечных волокон, расположенных с обе-



Puc. 7. Кости правой кисти: <math>a-c ладонной стороны; b-c тыльной стороны

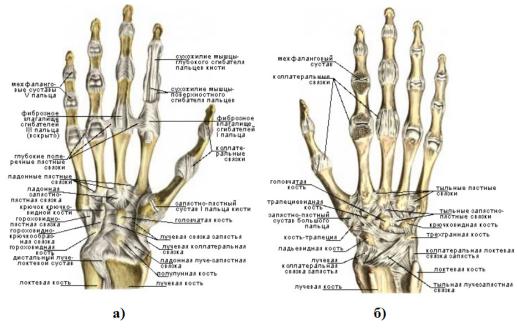


Рис. 8. Связки и суставы правой кисти: а - с ладонной стороны; б - с тыльной стороны

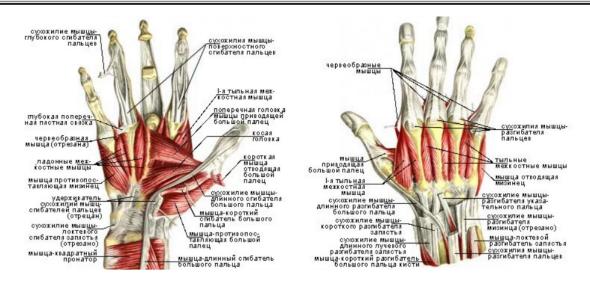


Рис. 9. Мышцы правой кисти: а – с ладонной стороны; б – с тыльной стороны

их сторон (ладонной и тыльной) несколькими слоями. Мышцы кисти располагаются лишь на ладонной стороне. Здесь они образуют три группы: среднюю (в среднем отделе ладонной поверхности), группу мышц большого пальца и группу мышц малого пальца [6].

Человеческая кисть руки является невероятно сложным анатомическим образованием. Однако именно благодаря этому образованию человек может выполнять самые разные работы (сложные, изящные), без которых невозможно представить современный мир.

Идея создания оптимизированного роботапианиста не оригинальна, однако сам процесс сложен и непрост. Основными этапами проектирования робота являются:

- 1. Определение требований к системе.
- 2. Разработка 3D модели исполняемого механизма.
- Разработка скетчей для работы модуля робота.
 - 4. Общая сборка.

Однако в рамках статьи ограничимся двумя первыми пунктами.

В качестве платформы для обработки системы может быть использована зарекомендовавшая себя платформа *Arduino* (табл. 1). Среда раз-

Таблица 1 Характеристики платформы Arduino Uno

Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение	5 B
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 B
Входное напряжение (предельное)	6-20 B
Цифровые Входы/Выходы	14
Аналоговые входы	6
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА

работки плат ввода-вывода *Arduino* основана на Си-подобном языке *Processing/Wiring*. Преимущество данной платформы над другими системами:

- сравнительная дешевизна плат;
- кросплатформенность;
- простая и понятная среда программирования;
- открытое и расширяемое программное обеспечение;
- открытый исходный код и расширяемое оборудование (разнообразие датчиков).

В качестве исполнительных органов для подобного робота целесообразно выбрать серводвигатели – приводы с управлением через отрицательную обратную связь, с помощью которой возможно точно управлять параметрами движения. Сервоприводом является любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т. п.) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике и устройстве согласно заданному внешнему значению (рис. 10).

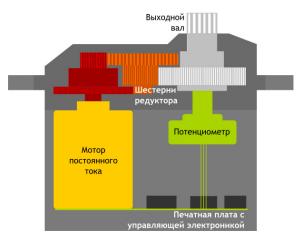


Рис. 10. Устройство сервопривода

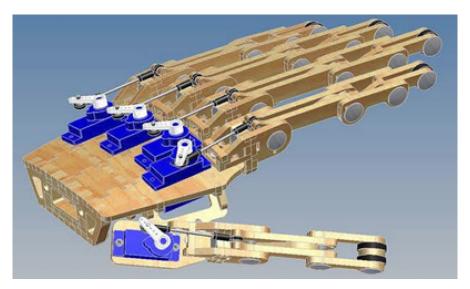


Рис. 11. Модель модуля антропоморфного робота с пятью серводвигателями

Используя подключаемые к плате серводвигатели Micro Servo SG90 (табл. 2), предварительно разработав конструкцию манипулятора, можно добиться определенных успехов (рис. 11). В общем случае сервопривод подключается тремя проводами: питание, земля и сигнальный. Провод питания может быть подключен к выводу +5V на плате Arduino. Провод заземления к GND выводу Arduino. Провод сигнала подключается к цифровому выводу котроллера Arduino [3].

Из технического задания по разработке модуля антропоморфного робота ясно, что расчет усилия зажима объекта проводить ненужно, так как зажима фактически не происходит. Однако определение допустимых усилий модуля робота необходимо проводить с позиций неповреждаемости.

В первую очередь это касается механизмов серводвигателей. Превышение допустимого предела усилия нажатия приведет или к разрушению механизма, или к деформациям, несовместимым с понятием его годности. Контактные напряжения $\zeta_{\rm K}$ на клавишах должны быть меньше допустимых [4]:

$$\zeta_{\kappa} \le [\zeta_{\kappa}], H/M^2 \tag{1.1}$$

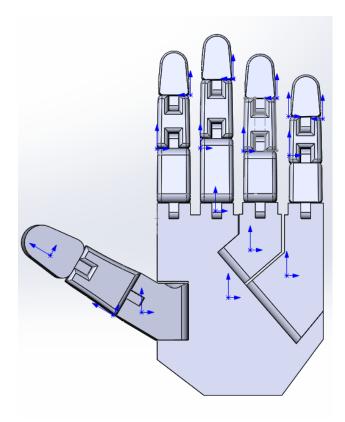
Усилий, создаваемых выбранными серводвигателями, достаточно для нажатия клавиш как синтезатора, так и оригинального фортепиано. Определение допустимых усилий реализуется программно (увеличение/уменьшение угла пово-

Таблица 2 Характеристики сервопривода Micro Servo SG90

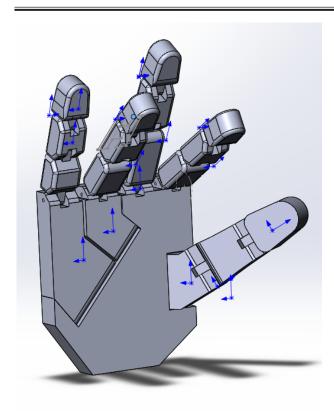
	<u>'</u>		
Рабочая скорость	8,73 рад/с		
Bec	13 г		
Диапазон температуры	От -30 до +60 °C		
Рабочее напряжение	3,5-8,4 B		

рота вала сервопривода) с учетом ряда экспериментов.

При разработке несложной, но объемной программы (объем зависит от количества нажимаемых клавиш и выдерживания пауз) для управления серводвигателями целесообразно использовать встроенную библиотеку Servo. Эта библиотека для *Arduino* контроллера предоставляет набор функций для управления сервоприводами. Стандартные сервоприводы позволяют пово-



Puc. 12. Модель модуля антропоморфного робота в Solidworks



Puc. 13. Модель модуля антропоморфного робота в Solidworks

рачивать привод на определенный угол: от 0 до 180 градусов. Некоторые сервоприводы позволяют совершать полные обороты на заданной скорости. Библиотека Servo позволяет одновременно управлять 12 сервоприводами на большинстве плат Arduino Uno и 48 – на Arduino Mega [3].

Используя программу Solidworks, опираясь на анатомические данные, удалось разработать

следующую конструкцию модуля антропоморфного робота (рис. 12-13).

Подобная разработка в сборке будет иметь небольшую цену, низкую энергопотребляемость. Учитывая, что существуют аналоги платформ Arduino и серводвигателей Micro Servo SG90, не уступающие своими показателями оригиналам, можно подсчитать, что общая сумма для создания такого модуля не выйдет за пределы 2500 руб.

Библиографический список

- 1. Информационное areнтство. URL: https://www.unian.net/science/2094664-v-pekine-vyistupil-znamenityiy-robot-pianist-s-53-paltsami-foto-video.html (дата обращения: 12.03.2018).
- 2. Интернет магазин. URL: http://robo.club/product/robot-pianist.html (дата обращения: 12.03.2018).
- 3. Arduino форум URL: http://arduino.ru/ Reference/Library/Servo (дата обращения: 12.03.2018).
- 5. Иванов А. А. Основы робототехники. Нижний Новгород: НГТУ, 2011. 203 с.
- 6. Интернет-магазин. URL: https://ru.aliexpress.com/item/Robot-Mechanical-Arm-Claw-Humanoid-Right-Hand-Five-Fingers-with-Servos-for-Robotics-DIY-Assembled/32798007937. html (дата обращения: 12.03.2018).
- 7. Анатомия кисти. URL: http://moyaspina.ru/info/anatomiya-kisti (дата обращения: 12.03.2018).

УДК 531.391+621.865.8

О. Н. Крахмалев

кандидат технических наук, доцент Брянский государственный технический университет

МЕТОД СТРУКТУРНЫХ МУТАЦИЙ В МОДЕЛЯХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ РОБОТОВ

Рассмотрен метод целенаправленных структурных мутаций в моделях механизмов, позволяющий создавать приближенные динамические модели механизмов, в частности манипуляционных систем роботов, путем их модификации. Модификации проводятся в некоторых местах динамической модели путем замены выбранных частей модели на альтернативные им объекты.

Применение данного метода позволит компенсировать влияние случайных факторов, не учитываемых исходной динамической моделью, полученной аналитическими способами.

Ключевые слова: математическое моделирование, роботы, манипуляционные системы, динамические модели.

O. N. Krakhmalev

PhD, Tech., Associate Professor Bryansk State Technical University

METHOD OF STRUCTURAL MUTATIONS IN MODELS OF MANIPULATION SYSTEMS ROBOTS

The method of targeted structural mutations in the mechanisms models is considered, which makes it possible to create approximate dynamic models of mechanisms, in particular robotic manipulation systems, by modifying them. Modifications are carried out in some places of the dynamic model by replacing the selected parts of the model with alternative objects. The application of this method will compensate for the influence of random factors that are not taken into account by the initial dynamic model obtained by analytical methods.

Keywords: mathematical modeling, robots, manipulation systems, dynamic models.

Применение объектно-ориентированного подхода при составлении динамических моделей манипуляционных систем роботов позволило выделить общие части для структур большинства динамических моделей. Такие структурные части предложено рассматривать как базовые классы, на основе которых могут быть созданы другие более сложные классы, из которых уже непосредственно формируются динамические модели [1]. На основе данного подхода были разработаны методы создания динамических моделей, объединенные в общую методологию моделирования манипуляционных систем роботов.

Перспективной составляющей разработанной методологии, отражающей ее объектно-ориентированную направленность, является метод целенаправленных структурных мутаций в моделях механизмов. Метод позволяет создавать приближенные модели механизмов, в частности манипуляционных систем роботов, путем модификаций их математических моделей. Модификация проводится в некоторых местах объектной схемы ма-

тематической модели путем замены выбранных объектов на альтернативные им объекты.

Такое преобразование (модификация) математической модели не обязательно должно быть строго обоснованным (математически эквивалентным). Достаточно лишь соблюдения условия непрерывности вычислений. Мерой адекватности модифицированной модели может служить величина отклонения траектории движения модели от траектории движения реальной манипуляционной системы. Очевидно, что обе траектории будут отличаться от заданной (программной) траектории, соответствующей номинальной модели.

Применение метода структурных мутаций позволяет компенсировать влияние случайных факторов, не учитываемых аналитической моделью, которая, в нашем случае, является непрерывно детерминированной. В результате исходная аналитическая модель трансформируется в имитационную модель (рис. 1).

Название метода выбрано по аналогии с процессами мутаций, происходящими в молекулах



Рис. 1. Применение метода структурных мутаций

ДНК живых организмов. Однако модификации структуры математических моделей могут проводиться не случайно, а целенаправленно, по разработанным заранее методикам. Например, может быть использована методика анализа влияния распределения масс на динамику манипуляционных систем [2] или методика модификации динамической модели учитывающей угловые отклонения в шарнирах, рассмотренная ниже.

Объектно-ориентированный подход составления динамических моделей манипуляционных систем роботов

Динамические модели манипуляционных систем роботов могут быть построены известными методами теоретической механики. При этом необходимо учитывать, что процесс и результаты моделирования динамики манипуляционных систем существенно зависят от выбора метода построения этих моделей. В зависимости от метода составления уравнений движения могут быть получены различные по эффективности и своим функциональным возможностям динамические модели [3-8].

Например, метод Лагранжа-Эйлера дает известную динамическую модель

$$[M_s]\{\ddot{q}\}+\{\dot{q}\}^T[C_s]\{\dot{q}\}=Q_s, s=(1,...,n),$$
 (1)

где

$$\begin{split} \{q\} \!=\! & \big[q_1,\!q_2,\!\dots,\!q_n\big]^T \,, \, \{\dot{q}\} \!=\! \big[\dot{q}_1,\!\dot{q}_2,\!\dots,\!\dot{q}_n\big]^T \,, \\ \{\ddot{q}\} \!=\! \big[\ddot{q}_1,\!\ddot{q}_2,\!\dots,\!\ddot{q}_n\big]^T \,- \end{split}$$

векторы обобщенных координат и их производных по времени; Q_s — обобщенная сила по s-ой обобщенной координате.

 $[M_s]$ – матрица-строка (1×n) инерционных ха-

$$\begin{bmatrix} M_s(q) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left[m_j^{sk} \right], \quad m_j^{sk} = tr \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_s} H_k \frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_j} \right),
j = (1,...,n).$$
(2)

 $[C_s]$ — матрица $(n \times n)$ центробежных и кориолисовых эффектов

$$\begin{bmatrix}
(n \times n) \\
[C_{s}(q)] = \sum_{k=1}^{n} \left[c_{ij}^{sk} \right], \quad c_{ij}^{sk} = tr \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_{s}} H_{k} \frac{\partial^{2} A_{0,k}^{T}}{\partial q_{i} \partial q_{j}} \right),$$

$$i, j = (1, \dots, n). \tag{3}$$

Здесь H_k – матрица (4×4) инерции k-го звена, а $A_{0,k}$ – матрица (4×4) преобразования однородных координат из системы координат S_k , связанной с к-м звеном, в инерциальную систему координат S_0 , связанную с неподвижным основанием [3].

Составление динамической модели (1) может быть реализовано на основе объектно-ориентированного подхода. Данный подход активно применяется при разработке сложных компьютерных программ и реализован во многих языках программирования. Использование этого подхода позволяет повысить надежность компьютерных программ и вывести технологию их разработки на более высокий интеллектуальный уровень.

Объектно-ориентированный подход основывается на использовании понятия класса для описания совокупности объектов, имеющих общую структуру. Синтаксис и семантика построения классов могут быть заимствованы из языков объектно-ориентированного программирования, например, С++.

При составлении динамической модели (1) в качестве базовых классов, объединяющих типы используемых данных и методы их обработки, следует рассматривать два класса. Один класс определяет объекты, соответствующие матрицам преобразования однородных координат, другой соответствует матрицам инерции.

Объектами, соответствующими первому классу, будут матрицы $A_{(i-1),i}$ (4×4), позволяющие преобразовать координаты из системы координат S_i , связанной с i-м звеном, в систему координат S_{i-1} , связанную с (i-1)-м. При использовании метода двух связываемых систем координат данное преобразование выполняется через систему координат $S_{(i-1)*}$, также связанную с (i-1)-м звеном [3].

В этом случае матрицы $A_{0,k}$, используемые при вычислении элементов матриц $[M_s]$ и $[C_s]$, можно рассматривать как объекты этого же класса, так как

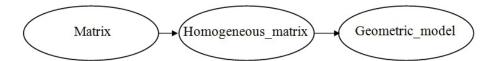
$$A_{(i-1),i}: S_i \to S_{(i-1)^*} \to S_{(i-1)},$$

$$A_{(i-1),i}(q_i) = A_{(i-1),(i-1)^*} A_{(i-1)^*,i}(q_i),$$
(4)

$$A_{(i-1),(i-1)^*}^{4\times4} = \begin{bmatrix} 3\times3 & 3\times1 \\ R_{(i-1),(i-1)^*} & L_{(i-1),(i-1)^*} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, (5)$$

$$A_{(i-1)^*,i}(q_i) = \\ -\sin(\beta_i q_i) \quad 0 \qquad 0$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\beta_i q_i) & -\sin(\beta_i q_i) & 0 & 0\\ \sin(\beta_i q_i) & \cos(\beta_i q_i) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & (1-\beta_i)q_i\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$



Puc. 2. Наследственная цепочка класса Geometric model

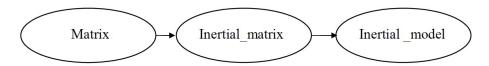


Рис. 3. Наследственная цепочка класса Inertial model

где $R_{(i-1),(i-1)^*}$ – матрица (3×3) поворота систем координат $S_{(i-1)}$ и $S_{(i-1)^*}$; $L_{(i-1),(i-1)^*}$ – вектор (3×1) координат начала системы $S_{(i-1)^*}$, в системе $S_{(i-1)}$, β_i определяет вид i-й кинематической пары: β_i =1 – вращательная, β_i =0 – поступательная.

$$A_{0,k}: S_k S_0,$$

$$A_{0,k} = \prod_{i=1}^{k} A_{(i-1),i}, \quad k = 1,...,n.$$
 (7)

Объектами, соответствующими второму из предложенных базовых классов, будут матрицы инерции звеньев H_k манипуляционной системы.

Разработана методика, позволяющая моделировать звенья манипуляционных систем твердыми телами. Звено практически любой геометрической формы, может быть смоделировано телами простой формы, или телами, ранее составленными из таких тел.

Матрица инерции H_k k-го звена может быть получена суммированием матриц инерции составляющих это звено тел H_k $_i$

$$H_k = \sum_{j=1}^{n_k} H_{k,j},$$
 (8)

где n_{b} – количество тел составляющих k-е звено.

Поскольку математические модели, описывающие движение манипуляционных систем, представляют собой матричные уравнения, то в качестве общего класса для всех объектов, соответствующих структурным частям таких математических моделей, целесообразно использовать класс матриц (Matrix).

В блоке описания данных этого класса должны быть определены переменные, с помощью которых могут быть представлены матрицы, например, двумерные массивы с элементами вещественного типа, а в блоке описания методов должны быть отражены функции, выполняющие типовые операции над матрицами, такие как сложение, вычитание, умножение и т. п.

Для описания объектов, представляющих собой матрицы преобразования однородных координат, необходимо на основе класса Matrix создать подкласс Homogeneous matrix матриц пре-

образования однородных координат. Такой подкласс нужно рассматривать как производный класс, построенный на основе класса Matrix, и наследующий его структуру. И уже на основе этого класса создать класс Geometric_model, содержащий специальные матрицы, составляющие геометрические модели манипуляционных систем (рис. 2).

По аналогии с разработанным классом Geometric_model, используя класс Matrix, создадим сначала класс Inertial_matrix, содержащий структуру матриц инерции и методы, выполняющие их инициализацию и операции с ними, и на основе этого класса создадим класс Inertial_model, соответствующий инерционной модели манипуляционных систем (рис. 3).

Определение классов Geometric_model и Inertial_model позволяет реализовать технологию объектного представления динамических моделей манипуляционных систем роботов, на основе построения их объектных схем.

Объектное представление динамических моделей

Правила построения объектных схем рассмотрим на примере объектов класса Matrix. Будем обозначать объекты этого класса в форме прямоугольников. Выполнение операций с объектами, представленными на схемах, должно производиться сверху-вниз и справа-налево.

Операцию умножения двух объектов Object_1 и Object_2 изображают приставлением изображения одного объекта к изображению другого объекта по одной из сторон (рис. 4), а операцию умножения объекта на скаляр, так как изображено на рис. 5.

Операцию сложения двух или нескольких объектов типа Matrix будем изображать так, как показано на рис. 6, а вычитание одного объекта из другого объекта будем изображать так, как показано на рис. 7.

Изображение операции присваивания значения одного объекта другому объекту представлено на рис. 8. В данном случае объекту Object_1 будут присвоены значения объекта Object 2.

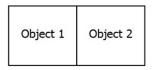


Рис. 4. Умножение объектов

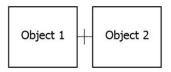


Рис. 6. Сложение объектов

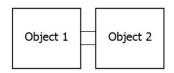


Рис. 8. Операция присваивания

Обозначение операции транспонирования объекта с присвоением результата другому объекту этого же класса представлено на рис. 9.

Другие операции имеют соответствующие им графические обозначения. Следует отметить, что операции над объектами классов реализуют математические операции над определенными данными, описанными в соответствующем классе. Возможность представлять операции над данными объектов в виде операций над самими объектами называется процедурой перегрузки операций, которая может быть реализована средствами объектно-ориентированных языков программирования, например, языка С++.

Схема объектного представления динамической модели (1) будет иметь вид (рис. 10).

Объектные схемы, моделирующие матричные коэффициенты Ms и Cs, могут быть получены на основе выражений (2) и (3).

ны на основе выражений (2) и (3). Например, элемент m_j^{sk} матрицы [m_j^{sk}] для случая j=1, s=2, k=3 может быть вычислен на основе выражения

$$m_1^{23} = tr \left(\frac{\partial A_{0,3}}{\partial q_2} H_3 \frac{\partial A_{0,3}^T}{\partial q_1} \right). \tag{9}$$

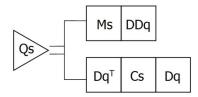


Рис. 10. Схема объектного представления динамической модели (1)

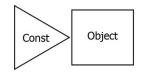


Рис. 5. Умножение на скаляр

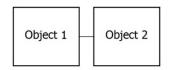


Рис. 7. Вычитание объектов

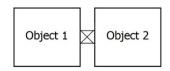


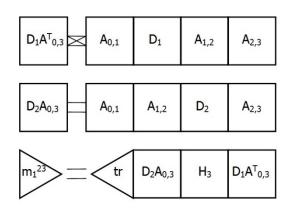
Рис. 9. Операция транспонирования

Схема, соответствующая объектному представлению математической модели (9), имеет вид (рис. 11). В схеме представлена операция tr, выполняющая вычисление суммы диагональных элементов матрицы, стоящей справа. На объектных схемах данная операция обозначается, как и скалярный объект, треугольным элементом, но повернутым на 180 градусов.

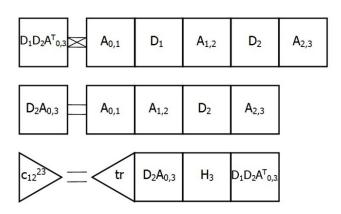
Объектные схемы для моделирования остальных элементов m_j^{sk} для всех возможных значений индексов j, s и k могут быть составлены аналогично.

Элемент c_{ij}^{sk} матрицы [c_{ij}^{sk}] для случая i=1, j=2, s=2, k=3 может быть вычислен на основе выражения

$$c_{12}^{23} = tr \left(\frac{\partial A_{0,3}}{\partial q_2} H_3 \frac{\partial^2 A_{0,3}^T}{\partial q_1 \partial q_2} \right). \tag{10}$$



 $Puc.\,11.\,Cx$ ема объектного представления элемента m_1^{23}



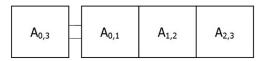
 $Puc.\ 12.\ Cxema$ объектного представления элемента c_{12}^{23}

Схема, соответствующая объектному представлению математической модели (10) имеет вид (рис. 12).

Аналогично могут быть составлены объектные схемы для моделирования элементов c_{ij}^{sk} для всех возможных значений индексов i, j, s и k.

В объектные схемы, представленные на рис. 10 и 11, включены схемы, соответствующие математической модели (7). Например, для случая k=3, соответствующего трехзвенной манипуляционной системе, объектная схема будет содержать строку (рис. 13).

Структурная схема объектного представления операции вычисления частных производных от матриц преобразования однородных координат может быть составлена на основе использо-



 $Puc.\,13.\,O$ бъектная схема математической модели $A_{0,3}\!\!=\!\!A_{0,1}A_{1,2}A_{2,3}$

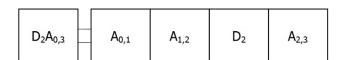
вания объектов, соответствующих специальным матрицам дифференцирования D (рис. 14).

Структурная схема объектного представления операции вычисления матрицы инерции третьего звена H_3 , моделируемого тремя телами с матрицами инерции $H_{C3,1}\,H_{C3,2},H_{C3,3}$, в соответствии с выражением (8) будет иметь вид (рис. 15).

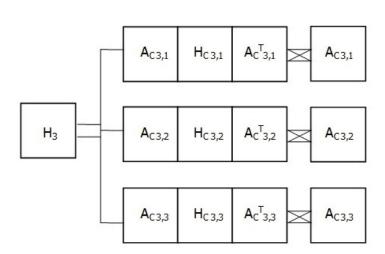
Динамическая модель, учитывающая угловые отклонения в шарнирах

Для моделирования угловых отклонений будем рассматривать манипуляционные системы, в структуре которых используются 3-степенные шарниры. Уравнения движения, учитывающие угловые отклонения в шарнирах манипуляционных систем, могут быть получены методом Лагранжа-Эйлера. Динамическая модель, построенная на этих уравнениях, будет иметь вид [3]

$$\begin{bmatrix} M_{i}^{\alpha\alpha} \end{bmatrix} \{ \ddot{\alpha} \} + \begin{bmatrix} M_{i}^{\alpha\beta} \end{bmatrix} \{ \ddot{\beta} \} + \begin{bmatrix} M_{i}^{\alpha\gamma} \end{bmatrix} \{ \ddot{\gamma} \} + \\
+ \{ \dot{\alpha} \}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\alpha\alpha\alpha} \end{bmatrix} \{ \dot{\alpha} \} + \{ \dot{\beta} \}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\alpha\beta\beta} \end{bmatrix} \{ \dot{\beta} \} + \{ \dot{\gamma} \}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\alpha\gamma\gamma} \end{bmatrix} \{ \dot{\gamma} \} + \\
+ 2 \begin{bmatrix} \{ \dot{\alpha} \}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\alpha\alpha\beta} \end{bmatrix} \{ \dot{\beta} \} + \{ \dot{\alpha} \}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\alpha\alpha\gamma} \end{bmatrix} \{ \dot{\gamma} \} + \\
+ \{ \dot{\beta} \}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\alpha\beta\gamma} \end{bmatrix} \{ \dot{\gamma} \}
\end{bmatrix} = Q_{i}^{\alpha}, (11)$$



 $Puc.~14.~Объектное представление \ rac{\partial A_{0,3}}{\partial q_2} = A_{0,1}A_{1,2}D_1A_{2,3}$



Puc.~15.~Cxема объектного представления матрицы инерции H_{2}

$$\begin{bmatrix} M_{i}^{\beta\alpha} \end{bmatrix} \{\ddot{\alpha}\} + \begin{bmatrix} M_{i}^{\beta\beta} \end{bmatrix} \{\ddot{\beta}\} + \begin{bmatrix} M_{i}^{\beta\gamma} \end{bmatrix} \{\ddot{\gamma}\} + \\
+ \{\dot{\alpha}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i} \end{bmatrix} \{\ddot{\alpha}\} + \{\dot{\beta}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i} \end{bmatrix} \{\dot{\beta}\} + \{\dot{\gamma}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i} \end{bmatrix} \{\dot{\gamma}\} + \\
+ 2 \begin{bmatrix} \{\dot{\alpha}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\beta\alpha\beta} \end{bmatrix} \{\dot{\beta}\} + \{\dot{\alpha}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\beta\alpha\gamma} \end{bmatrix} \{\dot{\gamma}\} + \\
+ \{\dot{\beta}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\beta\beta\gamma} \end{bmatrix} \{\dot{\gamma}\} \end{bmatrix} = Q_{i}^{\beta}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} M_{i}^{\gamma\alpha} \end{bmatrix} \{\ddot{\alpha}\} + \begin{bmatrix} M_{i}^{\gamma\beta} \end{bmatrix} \{\ddot{\beta}\} + \begin{bmatrix} M_{i}^{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \{\ddot{\gamma}\} + \\
+ \{\dot{\alpha}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i} \end{bmatrix} \{\dot{\alpha}\} + \{\dot{\beta}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i} \end{bmatrix} \{\dot{\beta}\} + \{\dot{\gamma}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i} \end{bmatrix} \{\dot{\gamma}\} + \\
+ 2 \begin{bmatrix} \{\dot{\alpha}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\gamma\alpha\beta} \end{bmatrix} \{\dot{\beta}\} + \{\dot{\alpha}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\gamma\alpha\gamma} \end{bmatrix} \{\dot{\gamma}\} + \\
+ \{\dot{\beta}\}^{T} \begin{bmatrix} C_{i}^{\gamma\beta\gamma} \end{bmatrix} \{\dot{\gamma}\} \end{bmatrix}$$

где $\{\dot{\alpha}\},\{\ddot{\alpha}\},\{\dot{\beta}\},\{\ddot{\beta}\},\{\ddot{\gamma}\},\{\ddot{\gamma}\}$ — векторы $(n\times 1)$ скоростей и ускорений угловых обобщенных координат; Q_i^{α} , Q_i^{β} , Q_i^{γ} — обобщенные силы, соответствующие угловым обобщенным координатам α , β и γ в i-м шарнире. Матричные коэффициенты уравнений (11-13) по своей структуре, аналогичны коэффициентам (2) и (3) в уравнении (1).

Представленная динамическая модель позволяет учитывать угловые отклонения, возникающие при движении манипуляционных систем из-за скручивания шарниров. Существенно влияют на скручивание зазоры, имеющиеся в шарнирах. К скручиванию также приводит упругая податливость, сосредоточенная в шарнире, являющаяся результатом контактного взаимодействия составляющих шарнир элементов. Скручивания шарниров могут быть вызваны упругой податливостью опорного для данного шарнира звена, т. е. звена, ближайшего к основанию манипуляционной системы.

Упругая податливость в уравнениях (11–13) может быть учтена при составлении левой части этих уравнений заданием упругой составляющей обобщенной силы.

Полученные уравнения предназначены для оценки влияния кручения шарниров на динамическую точность манипуляционных систем. Они могут быть использованы как при расчете малых углов закручивания шарниров, так и углов — сопоставимых с изменениями обобщенных координат, задающих программное движение манипуляционной системы.

При составлении уравнений данной динамической модели следует учитывать некоммутативность рассматриваемых угловых отклонений. Поэтому в зависимости от выбранной последовательности угловых отклонений могут быть получены соответствующие уравнения. Всего таких последовательностей — по три угловых отклонения в каждой — может быть 6.

В связи с этим при моделировании движения реального манипуляционного робота с учетом угловых отклонений, возникающих в его шар-

нирах, с использованием динамической модели (11–13) возникает проблема, связанная с определением последовательности угловых отклонений, возникающих в каждом шарнире манипуляционной системы. Поскольку причины, вызывающие такие отклонения, носят случайный характер, определение искомых последовательностей аналитическими методами является крайне затруднительным и практически не представляется возможным.

По существу задача сводится к формированию матриц $A_{(i-1)^*,i}$ определяемых в данном случае не выражением (6), а последовательностью произведений трех матриц, каждая из которых соответствует одному из угловых отклонений α , β или γ

$$A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$A_{(i-1)^*,i}(\beta_i) = \begin{bmatrix} \cos\beta_i & 0 & \sin\beta_i & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ -\sin\beta_i & 0 & \cos\beta_i & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} cos(b_i\gamma_i) & -sin(b_i\gamma_i) & 0 & 0\\ sin(b_i\gamma_i) & cos(b_i\gamma_i) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & (1-b_i)\gamma_i \end{bmatrix}, (16)$$

 $b_i \! = \! 1$, если i-й шарнир является вращательным, и $b_i \! = \! 0$ — если поступательным.

Представленная ниже последовательность выражений наглядно иллюстрирует данную проблему, которая усугубляется еще и тем, что подобный выбор необходимо выполнять для каждого шарнира.

$$\begin{split} &A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) = A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i)A_{(i-1)^*,i}(\beta_i)A_{(i-1)^*,i}(\gamma_i),\\ &A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) = A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i)A_{(i-1)^*,i}(\gamma_i)A_{(i-1)^*,i}(\beta_i),\\ &A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) = A_{(i-1)^*,i}(\beta_i)A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i)A_{(i-1)^*,i}(\gamma_i), \end{split}$$

$$\begin{split} A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) &= A_{(i-1)^*,i}(\beta_i) A_{(i-1)^*,i}(\gamma_i) A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i), \\ A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) &= A_{(i-1)^*,i}(\gamma_i) A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i) A_{(i-1)^*,i}(\beta_i), \\ A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) &= \\ &= A_{(i-1)^*,i}(\gamma_i) A_{(i-1)^*,i}(\beta_i) A_{(i-1)^*,i}(\alpha_i). \end{split}$$
(17)

Обеспечить необходимую адекватность синтезируемой динамической модели реальному манипуляционному роботу можно на основе совместного перебора возможных комбинаций отклонений (17) для всех шарниров. При этом для

каждой комбинации необходимо сформировать динамическую модель (11–13) и сопоставить получаемые на ее основе результаты с движением реального робота.

Модификация динамических моделей методом структурных мутаций

Выполнить модификацию динамической модели и анализ ее адекватности можно на основе метода структурных мутаций моделей механизмов.

В рассмотренном выше примере синтеза динамической модели манипуляционной системы робота, учитывающей угловые отклонения в шарнирах его исполнительного механизма, метод структурных мутаций позволяет автоматизировать данную процедуру.

Для использования этого метода предварительно необходимо создать объектную схему исследуемой динамической модели. Для динамической модели (11–13) объектная схема может быть построена по аналогии с рассмотренным примером объектного представления динамической модели (1).

Формализация процедуры создания необходимых объектов и их сборки в объектные схемы основывается на методе визуального конструирования математических моделей. Разработка объектных схем динамических моделей может выполняться в среде специальной компьютерной программы, автоматизирующей данную процедуру.

По методу структурных мутаций объектная схема исследуемой динамической модели может быть модифицирована путем замены ее отдельных частей на аналогичные. При этом должно соблюдаться условие непрерывности вычислений, выполняемых на основе модифицированной модели.

При модификации динамической модели (11—13) необходимо, в той части ее объектной схемы, в которой формируется геометрическая модель манипуляционной системы, выполнидь замену объекта соответствующего матрице $(i-1)^n$, на аналогичный объект из списка, содержащего последовательность возможных вариантов (17).

Тогда сформированные на их основе объекты, соответствующие матрицам

$$A_{(i-1),i} = A_{(i-1),(i-1)}^* A_{(i-1)^*,i} (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i), \quad (18)$$

будут использованы в последующих частях объектной схемы исследуемой динамической модели (см. рис. 11–14).

Выбор подходящей последовательности угловых отклонений для каждого шарнира может выполняться как последовательным перебором всех возможных сочетаний угловых отклонений, так и с использованием алгоритмов нечеткого вывода. Использование нечеткой логики в процессе принятия решения позволит снизить

вычислительные затраты, связанные с получением необходимой динамической модели.

Дальнейшее развитие метода модификации динамических моделей путем замещения некоторых элементов их структуры на аналогичные и получения на основе этого новых качеств модели может быть обеспечено на основе использования искусственного интеллекта, реализованного на основе обучаемых систем, например, нейронных сетей.

Рассмотрен метод целенаправленных структурных мутаций в динамических моделях манипуляционных систем роботов, позволяющий создавать приближенные динамические модели этих систем путем их модификации. Модификации проводятся в некоторых местах динамической модели путем замены выбранных частей модели на альтернативные им объекты. Применение данного метода позволит компенсировать влияние случайных факторов, не учитываемых исходной динамической моделью, полученной аналитическими способами. Дальнейшее развитие данного метода может быть обеспечено на основе использования искусственного интеллекта, реализованного на основе обучаемых систем.

Библиографический список

- 1. *Крахмалев О. Н.* Объектно-ориентированное моделирование динамики манипуляционных систем на основе матриц преобразования однородных координат // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 2(15). С. 32–36.
- 2. *Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И.* Исследование движения манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 10. С. 3–6.
- 3. *Крахмалев О. Н.* Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов. Брянск: БГТУ, 2012. 200 с.
- 4. Косенко И. И. Применение объектно-ориентированной парадигмы для построения модели динамики систем тел // Нелинейная динамика: сб. научн. тр. III Междунар. школы-конференции молодых ученых. М.: ИМАШ РАН, 2016. С. 176—188.
- 5. Коренев Γ . В. Целенаправленная механика управляемых манипуляторов. М.: Наука, 1979. 448 с.
- 6. *Коловский М. З., Слоущ А. В.* Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука, 1988. 240 с.
- 7. И ревич E. U. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 359 с.
- 8. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989. 368 с.

УДК 629.735.33

А. И. Савельев*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

А. Ю. Едемский*

программист

Д. А. Малов*

аспирант, младший научный сотрудник

Д. Р. Чухно**

магистрант

В. Д. Кудрин**

магистрант

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук ** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПЕРЕДАЧА СЛУЖЕБНЫХ И МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ ДАННЫХ В ІОТ-СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ ДЛЯ ПРОАКТИВНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И НАВИГАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В КИБЕРФИЗИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ¹

Предложен универсальный подход к организации IOT-сетей с использованием гибридных модулей, которые обеспечивают гибкость, масштабируемость, энергоэффективность и универсальное использование сети для передачи различных типов мультимедийных данных.

Этот подход учитывает программные и аппаратные особенности устройств передачи данных в ІОТ-сетях, что позволяет автоматизировать процесс связи модулей, выбранных пользователем.

Ключевые слова: IOT-сети, беспроводные устройства, гибридные устройства связи, передача мультимедийных данных, автоматическое соединение узлов сети.

A. I. Saveliev*

PhD, Tech., Senior researcher

A. Y. Edemskii*

Programmer

D. A. Malov*

PhD Student, Junior Researcher

D. R. Chuhno **

Postgraduate Student

V. D. Kudrin**

Postgraduate Student

- * St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
- **St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект № МК-383.2018.9).

TRANSFER OF SERVICE AND MULTIMEDIA DATA TO IOT NETWORKS USING HYBRID COMMUNICATION DEVICES FOR PROACTIVE LOCALIZATION AND USER NAVIGATION IN THE CYBERPHYSICAL SPACE

The authors proposed a universal approach to the organization of IoT-networks using hybrid modules that provide flexibility, scalability, energy efficiency and universal use of the network for the transmission of various types of multimedia data. This approach takes into account the software and hardware features of data transmission devices in IoT-networks, which allows to automate the communication process of modules selected by the user.

Keywords: IoT-network; wireless devices; hybrid communication devices; transfer of multimedia data, automatic connection of network nodes.

ІОТ-сети являются одним из наиболее перспективных решений для повышения уровня автоматизации в различных сферах деятельности человека. В настоящее время ІОТ-технологии успешно внедряются как в сфере услуг, так и в реальном секторе экономики, например, в добывающей промышленности. Одной из самых популярных на данный момент сферой применения ІОТтехнологий являются системы «Smart Home», позволяющие упростить взаимодействие человека с устройствами и системами его дома [1, 2]. Подобные технологии также находят свое применение в медицине [3, 4], где они используются для получения, хранения и передачи информации о показателях жизненно важных функций человека. Обработка большого количества информации, получаемой и генерируемой датчиками ІОТсистемы, позволяет составлять аналитические отчеты, а также рекомендации для лиц, принимающих решение [5, 6]. Аналитические данные, собранные ІОТ-системами, могут быть полезны также при эксплуатации и тестировании различных устройств. Например, в работе [7] представлен метод мониторинга состояния конструкций летательных аппаратов на стадии тестирования при помощи беспроводных сенсорных сетей (БСС). В статье рассмотрен алгоритм передачи данных по БСС с использованием технологии организации беспроводных IOT-сетей ZigBee, а также представлена модель БСС, состоящая из шлюза, маршрутизатора и мотов (автономные вычислительные устройства) с датчиками. Использование созданных на основе технологии БСС систем мониторинга авиационных конструкций позволяет организовать централизованное управление режимами сбора данных в процессе испытаний, осуществлять непрерывный сбор данных с датчиков различного типа с заданной частотой измерений, оперативно обрабатывать и отображать данные в режиме реального времени.

Помимо передачи различной информации, ІОТ-сети могут, в частности, облегчить решение задачи локализации и навигации автономных подвижных объектов в помещениях (пользователей, робототехнических платформ и др.). К примеру, авторами статьи [8] были проведены исследования с целью создания комбинированного ме-

тода локализации подвижного объекта для повышения точности его позиционирования в помещении с использованием беспроводных технологий. В работе рассматривается определение текущего местоположения человека в пространстве с использованием встроенных датчиков и технологий, поддерживаемых большинством современных мобильных устройств: акселерометра, гироскопа, магнитометра, датчика приближения, датчика освещенности, а также Wi-Fi, Bluetooth, GSM, NFC. Наилучшим решением, по мнению авторов работы, являются Bluetooth-маяки, работающие по технологии iBeacon. Кроме того, эксперименты, проведенные в работе, показали перспективность комбинированного подхода.

Одной из особенностей беспроводных ІОТсетей является общая эфирная среда, реализованная на основе единой технологии передачи данных, что усложняет множественный доступ «умных вещей» к эфирной среде. В работе [9] предложена процедура регулирования доступа «умных вещей» двух типов к эфирному каналу беспроводной сенсорной ІОТ-сети, которая позволит учесть особенности обслуживания трафика, имеющего неоднородный характер. Представленная математическая модель беспроводной сенсорной сети с регулируемым синхронновременным доступом к эфирной среде позволяет провести расчет характеристик передачи пакетов в подсетях и оценить влияние параметра регулирования доступа на качество обслуживания в каждой из рассматриваемых сетей.

Приведенный пример расчета подтверждает эффективность внедрения регулирования доступа для уменьшения задержек в обслуживании пакетов данных подсети высшего приоритета.

Обзор популярных аудио- и видеокодеков

Для передачи различных типов данных посредством ІОТ-сетей устройства системы должны обеспечивать необходимую пропускную способность каналов связи. Для более эффективной и быстрой передачи аудио- и видеоданных по сети используются кодеки, которые позволяют уменьшить объем передаваемых данных. Чтобы задаться минимальными параметрами скорости передачи данных, которым должны удовлетворять IOT-устройства, рассмотрим наиболее распространенные и широко используемые кодеки.

Кодек МЈРЕС [10] обеспечивает покадровый метод видеосжатия. В его основе лежит алгоритм сжатия изображений ЈРЕС, где каждый конкретный кадр кодируется независимо от остальных. Основным преимуществом данного метода является простота реализации, что особенно важно для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами. В отличие от МЈРЕС, кодек Н264 [11] использует помимо пространственной избыточности (при кодировании отдельного кадра) временную избыточность изображений в видеопотоке.

Таким образом, достигается большая степень сжатия (1:50) в отличие от MJPEG (1:20). Кодек VP8 [12] работает исключительно с 8-битовой схемой цветовой субдескритизации YUV 4:2:0 (на каждый пиксель 8 бит информации). В кодеке применяются два вида кадров: (в терминологии MPEG) I-frames и P-frames, т. е. используется как пространственная, так и временная избыточность. Однако в отличие от MPEG-стандарта, в кодеке VP8 не используется двунаправленное предсказание, т. е. нет аналогов B-frames кадров. В табл. 1 приведена необходимая минимальная скорость передачи данных для каждого из вышерассмотренных кодеков (данные приведены для разрешения 640×480, кадровой частоты 30 кадров в секунду).

Таблица 1
Фактическая скорость передачи выходных основных видеокодеков

Кодек	H.264	MJPEG	VP8
Необходимый	736	17800	11064
битрейт, Кбит/с			

Из данных табл. 1 видно, что наиболее требовательным к ресурсам сети является кодек MJPEG, поэтому возьмем его битрейт в качестве минимального порога пропускной способности канала при передаче видеоданных. Далее рассмотрим основные аудиокодеки.

Одним из наиболее популярных форматов кодирования звуковой информации с потерями является МРЗ. При использовании данного кодека строится диаграмма звука в виде последовательности коротких промежутков времени, затем на ней удаляется информация, не различимая человеческим ухом, а оставшаяся - сохраняется в компактном виде. Подход, реализуемый в данном кодеке, похож на метод сжатия, используемый алгоритмом JPEG. Другим наиболее популярным кодеком является FLAC. В отличие от МРЗ и других кодеков, обеспечивающих сжатие с потерями, данный кодек не удаляет никакой информации из аудиопотока и подходит как для прослушивания музыки на высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуре, так и для

архивирования аудиоколлекции. Следующий рассматриваемый кодек — Apple Loseless Audio Codec (ALAC) — аудиокодек, разработанный компанией Apple Inc для сжатия цифровой музыки без потерь данных. Тесты показывают, что сжатые в ALAC файлы получаются примерно от 40% до 60% размера оригиналов в зависимости от вида аудиоданных подобно другим форматам сжатия без потерь. Кроме того, скорость, с которой он может быть декодирован, делает его полезным для «умных устройств» внутри ІОТ-системы с ограниченными вычислительными ресурсами.

Среди кодеков, применимых для кодирования речевых звуков и фонем, а также музыкальных звуков, можно выделить Opus [13], [14]. Данный аудиокодек создан для интерактивных интернет-приложений. Кодек поддерживает обработку речи и музыки, работает в режимах с различным битрейтом, поддерживает интеграцию с RTP-протоколом и качественное маскирование потери пакетов с низкой алгоритмической задержкой. Поддерживает интервал битрейта 6 кб/с – 510 кб/с, 5 диапазонов частот от узкополосной (8 кГц) до полнополосной (48 кГц). Еще одним популярным кодеком является iSAC [15].

iSAC – это адаптивный кодек, работающий в полнополосном режиме с аудиоданными (32 кГц) с короткими задержками, применимый для высококачественной коммуникации в режиме реального времени. Создан специально для обеспечения качества речи в широкополосном режиме для приложений с низкой и средней скоростью передачи данных (в том числе с переменной скоростью). Можно выделить также кодек для кодирования речи iLBC [16], используемый для устойчивой речевой коммуникации посредством IP. iLBC создан для работы в узкополосном режиме кодирования речи с битрейтом выходных данных 13.33 кб/с и 15.20 кб/с (при длине фрейма 30 мс и 20 мс соответственно). В табл. 2 представлены значения битрейта для рассмотренных аудиокодеков.

Таблица 2
Фактическая скорость передачи выходных данных популярных аудиокодеков

Кодек	MP3	FLAC	Apple Lossless Audio Codec	Opus	iSAC	iLBC
Необходимый битрейт, Кбит/с	320	1200	256	510	56	16

Из данных табл. 2 видно, что наиболее требовательным к ресурсам сети является кодек FLAC, поэтому возьмем его битрейт в качестве минимального порога пропускной способности канала при передаче аудиоданных. На основе объема данных, генерируемых различными кодеками, можно примерно оценить предложенную нагрузку на IOT-сеть.

Основные характеристики модулей для передачи информации в IOT-сетях

Для выбора устройств связи в системе рассмотрим основные характеристики популярных технологий реализации беспроводных ІОТсистем (табл. 3).

Современные ІОТ-системы могут быть реализованы множеством способов, но для их унификации необходимо определить ряд технологий передачи данных, обладающих низким энергопотреблением и необходимой пропускной способностью для различных типов данных.

Наиболее перспективными технологиями, согласно приведенным характеристикам и анализу литературы, представляются Wi-Fi и Bluetooth. Рассмотрим их наиболее распространенные и доступные по цене встраиваемые аппаратные решения. На рис. 1, a, δ , в представлена линейка Bluetooth-модулей НМ. Данные модули могут вза-

имодействовать с датчиком или микроконтроллером посредством технологии UART-интерфейса.

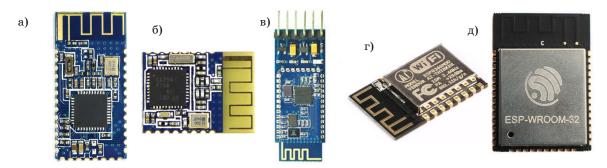
Модули НМ-10 и НМ-11 являются маломощными, что позволяет использовать их в системах с низким энергопотреблением. Радиус действия модулей на открытой местности достигает 60 м. Модули имеют малые массогабаритные характеристики и предустановленное в микроконтроллеры программное обеспечение. Модуль НМ-12 имеет радиус действия до 100 м на открытой местности. Кроме того, он обладает более низким по сравнению с другими модулями энергопотреблением. Все вышеприведенные модули совместимы с версиями технологии Bluetooth 3.0 и 2.1, поэтому могут быть использованы с предыдущими версиями модулей: НС-05, НС-06, НС-07. В табл. 4 представлены основные характеристики модулей НМ-10, НМ-11, НМ-12.

Основываясь на данных табл. 4, можно сделать вывод, что технология Bluetooth 4.0 может

Таблица 3

Основные технологии для создания ІОТ-сетей

Характеристики	ZigBee	Z-Wave	Insteon	Bluetooth 4.0	Wi-Fi
Используемые частоты	2,4 ГГц	868-908 МГц	~915 МГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц
Пропускная способ-	До 250	До 100 Кбит/с	1,2 - 180	До 1 Мбит/с	До 300 Мбит/с
ность	Кбит/с		Кбит/с		
Дальность сигнала	10 - 20 M	10 – 30 м	До 25 м	До 60 м	До 200 м
в помещении					
Максимальное количе-	65536	232	Не ограни-	8 устройств на одну	30
ство устройств в сети			чено	пикосеть, макс. 10 пи-	
				косетей	
Характеристики	\mathbf{ZigBee}	Z-Wave	Insteon	Bluetooth 4.0	Wi-Fi
Поддерживаемые	Клиент, точ-	Клиент, точка	Сеть из не-	Клиент, точка доступа	Клиент, точка
режимы	ка доступа	доступа	зависимых		доступа, клиент
	(CC2530)		устройств		и точка доступа
Количество подключа-	8	232	Не ограни-	7	30
емых устройств			чено		
к одному устройству					



Puc. 1. Bluetooth и Wi-Fi модули для IOT-систем: a) HM-10; б) HM-11; в) HM-12; г) ESP8266; д) ESP32

Таблица 4

Основные характеристики модулей НМ-10, НМ-11, НМ-12

Название	HM-10	HM-11	HM-12
Версия Bluetooth	4.0 BLE	4.0 BLE	4.0 EDR и BLE
Рабочее напряжение	3.3 V	3.3 V	3.3 V
Скорость передачи	9600 бит/с	115200 бит/с	115200 бит/с
Чувствительность	≤ -84 дБм на 0.1%	≤ -84 дБм на 0.1%	≤ -84 дБм на 0.1%

обеспечить передачу массивов текстовых данных при низких энергозатратах, но ее скорость и пропускная способность канала недостаточны для передачи аудио- и видеопотоков данных. Далее рассмотрим Wi-Fi технологию, которая обеспечивает достаточную пропускную способность для передачи мультимедийных данных.

Помимо Bluetooth-модулей, для передачи данных в ІОТ-системах используется, к примеру, широко распространенная линейка модулей ESP. Модуль ESP8266 (см. рис. $1, \varepsilon$), работает с интерфейсом UART, что упрощает процесс подключения к микроконтроллеру или другим периферийным устройствам. Модуль поддерживает два режима работы: клиент и точка доступа. Максимальная дальность связи достигает 400 м. Энергопотребление модуля составляет: 215мА в режиме передачи и до 62 мА в режиме приема. Рабочий стандарт модуля - 802.11 b/g/n. Скорость передачи данных модуля достигает 3 Мб/с, что может обеспечить передачу звука и изображений. Однако из-за ограниченной скорости нельзя организовать полноценную передачу потоковых видеоданных. Решить данную проблему может использование модуля ESP32 - это гибридный (Wi-Fi и Bluetooth) чип, разработанный для использования в системах, требующих минимальных показателей энергопотребления (носимая электроника, «интернет вещей» и др.). Корпус данного модуля имеет размеры 6х6 мм. Преимуществом данного модуля является совмещение в одном чипе Wi-Fi и Bluetooth технологий, двух процессорных ядер и богатого набора периферии. ESP32 поддерживает весь стек протоколов стандартов Wi-Fi 802.11n и BT4.2, обеспечивая данный функционал посредством интерфейсов SPI/SDIO или I²C/UART. Чип Espressif ESP 32 может работать в качестве центрального процессора (поддержка Ореп СРU) и как подчиненное устройство (Slave device), управляемое микроконтроллером. Максимальная мощность Wi-Fi на передачу составляет 19.5 dBm на скорости до 150 Мбит/с. Модуль поддерживает три режима работы: «клиент», «точка доступа», «клиент и точка доступа одновременно». Используя модуль ESP32, можно обеспечить передачу мультимедийных данных в IOT-сети при помощи Wi-Fi технологии. Технология Bluetooth позволит организовывать пикосети в режиме низкого энергопотребления и осуществлять передачу текстовых данных. Таким образом можно распределить нагрузку по передаче различных типов данных между несколькими стандартами сетей и обеспечить параллельную передачу информации. Кроме того, Bluetooth-технология позволяет создавать системы для локализации различных объектов в пространстве. Для узлов сети, не требующих передачи потоковых аудио- и видеоданных, можно использовать Bluetooth-модули линейки НС.

Построение математических моделей и алгоритмов функционирования IOT-сети

Рассмотрим зависимость скорости передачи данных от расстояния и зададимся максимально возможными расстояниями между модулями для стабильной передачи необходимых типов данных.

Для определения зависимости фактической скорости передачи данных от расстояния между передающей и приемной антеннами Wi-Fi сети воспользуемся данными, представленными в документации стандартов IEEE 802.11a и 802.11g. На основе первичного анализа документации можно сделать вывод о применимости линейной регрессии для аппроксимации экспериментальных данных. Выведем уравнение линейной регрессии вида y = ax + b, где b — свободный член уравнения, а - угловой коэффициент или градиент оцененной линии; представляющий собой величину, на которую у увеличивается в среднем, х увеличивается на одну единицу. Исходными данными для вывода уравнения являются массив значений расстояний между передающей и приемной антеннами $distance_{a,g}$ и фактического битрейта $\mathit{bitrate}_{a,g}$. Исходные данные для стандарта ІЕЕЕ 802.11а:

$$distance_a = [24,45,60,69,76,84,91,100],$$
 м; $bitrate_a = [54,48,36,24,18,12,9,6],$ Мбит/с.

Исходные данные для стандарта IEEE 802.11g:

$$\begin{aligned} distance_g = & \begin{bmatrix} 30,53,76,84,100,107,110,\\ 114,122,128,134,137 \end{bmatrix}, \, \text{M}; \\ bitrate_g = & \begin{bmatrix} 54,48,36,24,18,\\ 12,11,9,6,5.5,2,1 \end{bmatrix}, \, \text{Мбит/c}. \end{aligned}$$

Для определения коэффициентов *а и в воспользуемся* методом наименьших квадратов. В результате проведенных расчетов получим: уравнение регрессии для стандарта IEEE 802.11a, описываемое формулой (1), уравнение регрессии для стандарта IEEE 802.11g, описываемое формулой (2):

$$bitrate_a = -0.71 distance_a + 74.82$$
; (1)

$$bitrate_{g} = -0.54 distance_{g} + 72.3$$
. (2)

В формулах (1) и (2) $bitrate_{a,g}$ — фактическая скорость передачи данных, Мбит/с, $distance_{a,g}$ — расстояние между передающей и приемной антенной. На рис. 2 представлены графики, полученные на основе выведенных формул.

На графиках видно, что указанные стандарты способны поддерживать минимальный битрейт на уровне 10 Мбит/с на расстоянии 80-90 м в помещении без учета преград и перекрытий. Для определения зависимости фактической скорости передачи данных от расстояния между

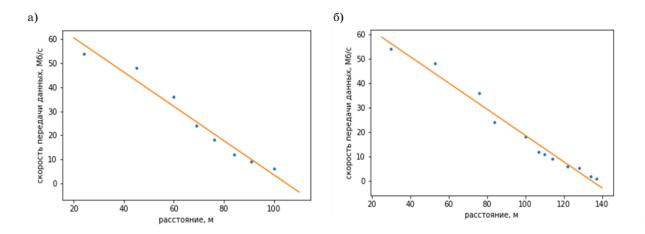


Рис. 2. Зависимость фактической скорости передачи данных от расстояния между передающей и приемной антенной: а) стандарт IEEE 802.11a; б) стандарт IEEE 802.11g

модулями *Bluetooth* воспользуемся формулой (3) [17], полученной на основе формулы Фрииса для распространения радиосигнала в свободном пространстве: [18]:

$$RSSI = P_o - 10n \lg \left(\frac{d}{d_o}\right), \tag{3}$$

где d — расстояние от устройства до передатчика, м; d_o — расстояние от устройства до точки, в которой выполнялось измерение мощности сигнала P_0 устройства (принималось равным 1 м); P_o — мощность сигнала устройства, измеренная на единичном расстоянии d_o от устройства (на расстоянии 1 м имеет значение 40 дБм); n — коэффициент потерь мощности сигнала для распространения в воздухе (принимался равным 2, преграды не учитывались); RSSI — полная мощность принимаемого приемником сигнала, дБм. По фактическим значениям RSSI, взятым из официальной документации стандарта Bluetooth IEEE 802.15.1, построим уравнение

регрессии вида y = ax + b. Исходными данными являются:

$$distance = \begin{bmatrix} 0,10,20,40,60,80,100 \end{bmatrix} \text{ M};$$

$$RSSI = \begin{bmatrix} -35,-38,-36,-37,-45,-48,-43 \end{bmatrix}, \text{ дБм}.$$

Переменная distance является массивом значений расстояний, а переменная RSSI - массив значений мощности принимаемого сигнала.

Для построения зависимости скорости передачи данных от расстояния между модулями, работающими по технологии Bluetooth, преобразуем значения RSSI из дБм в Вт, воспользовавшись формулой (4):

$$P_W = 10^{((P_{dBm} - 30)/10)}$$
. (4)

Далее рассчитаем емкость канала по теореме Шеннона-Хартли(5):

$$C = B \log_{2} \left(1 + \frac{RSSI}{N} \right), \tag{5}$$

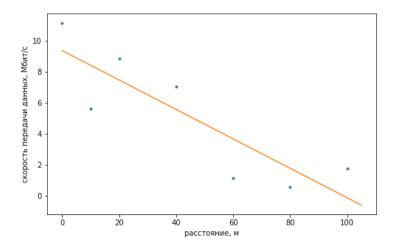


Рис. 3. Зависимость фактической скорости передачи данных от расстояния между передающей и приемной антеннами



рис. 4. Алгоритм создания связей между ІоТ устройствами

где C — емкость канала; B — полоса пропускания канала, RSSI — полная мощность сигнала, N — полная шумовая мощность. На рис. 3 представлен график, отражающий зависимость скорости передачи данных от расстояния между Bluetooth-модулями.

На графике видно, что Bluetooth-модули, в отличие от Wi-Fi-устройств, способны поддерживать фактическую скорость передачи данных на уровне 3,5 Мбит/с на расстоянии 65-70 м (в помещении без учета влияния преград). Данный показатель является удовлетворительным для передачи текстовых сообщений. Таким образом, для настройки подобных гибридных сетей конечным пользователем выбора оптимальных зон установки шлюза и устройств для соединения с глобальной сетью Интернет, необходимо создать автоматизированную систему, которая учитывала бы показанную выше разницу в скорости передачи данных различными модулями, а также их радиус действия. Для решения этой задачи были разработаны алгоритмы функционирования данной системы, представленные на рис. 4 и 5.

На вход алгоритма (рис. 4) подается массив необработанных устройств IOT-сети. Для каждого из устройств последовательно выполняются следующие шаги. Извлекаются данные о типе устройства, с помощью которых необходимо определить, с какими типами устройств может быть произведено сопряжение данного модуля. Определив тип устройства, система ищет ближайшее устройство для дальнейшего сопряжения. Если зоны работы устройств не пересекаются, то в сеть будет добавлено необходимое количество повторителей сигнала, которые обеспечат связь одного устройства с другим. После обеспечения взаимодействия зон работы устройств будет организована связь между ними. Для кор-

ректной работы алгоритма необходимо проверить количество оставшихся возможных связей у устройства. Если лимит связей исчерпан, то устройство помещается в массив недоступных и больше не будет использовано для поиска связей. Последним шагом будет проверка наличия еще необработанных устройств. После завершения работы данного алгоритма получим связи всех устройств ІОТ-сети.

Следующий алгоритм, представленный на рис. 5, позволит создать соединение локальной сети с глобальной сетью Интернет.

На вход алгоритма, представленного на рис. 5, подаются данные о конечном устройстве для соединения с глобальной сетью Интернет. Эти данные используются для создания области оптимальных зон установки шлюза или выбора ближайшего устройства с необходимым типом связи: пользователь должен указать точку в пространстве или устройство из ІОТ-сети. Далее система проверяет данные, введенные пользователем. Если выбрано устройство ІОТ-сети, то алгоритм переходит к последнему этапу работы. В случае выбора точки установки шлюза будет произведена проверка на оптимальность зоны работы шлюза и наличие в зоне действия шлюза устройств. Если зоны действия шлюза будет недостаточно для установления связи со всеми устройствами, в сеть будут добавлены повторители сигналов, иначе выбирается оптимальное количество устройств для соединения со шлюзом. Связи данных устройств и связанных с ними модулей разрываются и им назначается статус «не обработано». После этого данные устройства будут переданы на обработку алгоритму создания связей между ІОТ-устройствами (см. рис. 4). Последний этап - связь конечного устройства с глобальной сетью Интернет.

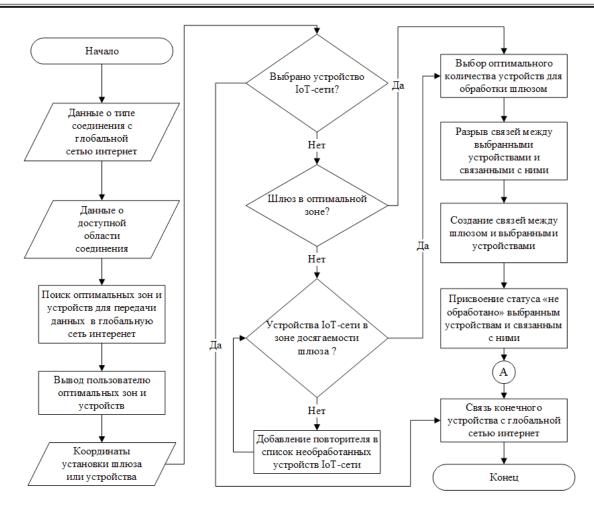


Рис. 5. Алгоритм соединения локальной ІоТ сети с глобальной сетью интернет

Основываясь на предложенных алгоритмах настройки связей между IOT-устройствами, опишем возможный интерфейс системы (рис. 6).

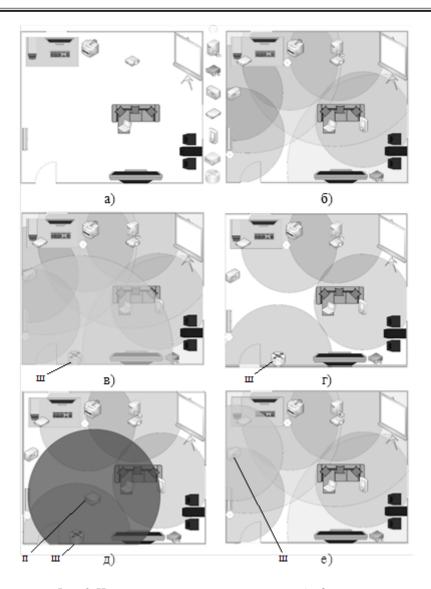
На первом этапе (а) пользователю доступны все устройства (кроме шлюза и повторителя), которые он может расположить на свободной территории комнаты. После того, как пользователь расставил все устройства, система покажет зоны действия устройств (б): больший диапазон действия имеет Wi-Fi модуль, меньший – *Bluetooth* модуля.

Если пользователь в качестве шлюза выбрал отдельное устройство, система предложит установить его в удобном месте (в): шлюз обозначен буквой «ш», после чего система на основе зоны действия шлюза определит возможность создания сети. В случае, если зоны действия шлюза недостаточно для надежной работы сети (г), система предложит установку повторителей сигнала в необходимых для этого местах (д): повторитель обозначен буквой «п», и будет ожидать подтверждения пользователем установки повторителей, либо переустановки шлюза в другое место.

В случае, если пользователь решил сделать выбранное ІОТ-устройство шлюзом, система покажет обновленную зону действия шлюза-устройства (e): устройство-шлюз обозначено бук-

вой «ш», и определит, сможет ли шлюз связаться со всеми устройствами в сети. После того, как были проведены необходимые расчеты для настройки сети, система будет ожидать подтверждения пользователем выбранной конфигурации.

Таким образом, в работе были проанализированы необходимые составляющие для построения ІОТ-сети. Найдены параметры, которым должны отвечать сетевые устройства для передачи мультимедийных данных. С учетом параметров были предложены существующие модули, которые обеспечивают необходимую скорость передачи потоковых аудио- и видеоданных. Кроме того, была проанализирована зависимость скорости передачи данных от расстояния для технологий, на базе которых выполнены модули. Полученные и проанализированные данные были положены в основу создания алгоритмов для автоматизированной связи модулей ІОТ-системы. Данные алгоритмы позволяют производить проверку расстояния между устройствами ІОТ-сети для обеспечения необходимой скорости передачи данных, добавлять повторители сигнала для связи наиболее удаленных частей системы и формировать соединения, обеспечивающие передачу данных узлов ІОТ-сети в глобальную сеть Интернет. Комбинирование технологий передачи



 $Puc.\,6.\,$ Интерфейс системы настройки гибридной сети

данных в аппаратной части системы обеспечивает энергоэффективность и снижение стоимости за счет слабонагруженных узлов сети с низкой пропускной способностью, а также высокий битрейт там, где необходимо передавать потоковые аудио- и видеоданные. Итак, гибридные модули передачи данных существенно расширяют диапазон возможностей и области применения ІОТсетей и могут быть интегрированы в различные робототехнические системы [19,20] для связи с киберфизическим пространством [21, 22, 23] и обеспечения взаимодействия с пользователями посредством передачи мультимедийной информации [24, 25].

Библиографический список

1. *Ghayvat H*. et al. WSN-and IOT-based smart homes and their extension to smart buildings // Sensors. 2015. T. 15. No. 5. C. 10350-10379.

- 2. Perumal T., Datta S. K., Bonnet C. IOT device management framework for smart home scenarios // Consumer Electronics (GCCE). 2015. IEEE 4th Global Conference on. IEEE. C. 54–55.
- 3. Yang G. et al. A health-IOT platform based on the integration of intelligent packaging, unobtrusive bio-sensor, and intelligent medicine box // IEEE transactions on industrial informatics. 2014. T. 10. No. 4. C. 2180-2191.
- 4. Zanjal S. V., Talmale G. R. Medicine Reminder and Monitoring System for Secure Health Using IOT // Procedia Computer Science. 2016. T. 78. C. 471–476.
- 5. Riggins F. J., Wamba S. F. Research directions on the adoption, usage, and impact of the internet of things through the use of big data analytics // System Sciences (HICSS). 2015 48th Hawaii International Conference on. IEEE, 2015. C. 1531–1540.
- 6. Barnaghi P., Sheth A., Henson C. From data to actionable knowledge: Big data challenges in the web of things [Guest Editors' Introduction] // IEEE Intelligent Systems. 2013. T. 28. №. 6. C. 6–11.

- 7. Сергиевский М. В., Сыроежкин С. Н. Использование беспроводных сенсорных сетей для сбора, передачи и обработки информации в системах мониторинга состояния объектов // Cloud of science. 2016. Т. 3. №. 1. С. 125–135.
- 8. *Рустинов В. А., Сорокин А. Р.* Комбинированный метод локализации подвижных объектов // Радиоэлектроника и информатика. 2014. №. 4(67). С. 83–88.
- 9. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омельян А. В. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей // Омский научный вестник. 2016. №. 4 (148). С. 147–151.
- 10. Won-Ho Kim, Hyun-Sul Lee, Nuwan Sanjeewa. Motion-JPEG Compression based Wireless Video Transmitter and Receiver for Vision Sensor Network. Life Science Journal 2014. 11(7). C. 612–618.
- 11. Feng D. Y. et al. Research on storage algorithm of video stream in video surveillance system based on H. 264 // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2014. T. 543. P. 3561–3564.
- 12. *Uhrina M., Bienik J., Vaculik M.* Coding efficiency of VP8 and VP9 compression standards for high resolutions // ELEKTRO, 2016. IEEE, 2016. P. 100–103.
- 13. Valin J. M. et al. High-quality, low-delay music coding in the opus codec // arXiv preprint arXiv:1602.04845. 2016.
- 14. *Jokisch O.* et al. Audio and speech quality survey of the opus codec in web real-time communication // Elektronische Sprachsignalverarbeitung. 2016. Tagungsband der 27. Konferenz. 2015. T. 81. P. 254–262.
- 15. Jones P. et al. RTP Payload Format for the iSAC Codec. 2013.
- 16. López-Oller D., Gomez A. M., Pérez-Crdoba J. L. Source-based error mitigation for speech transmissions over erasure channels // Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2014. Proceedings of the 22nd European. IEEE, 2014. P. 1242–1246.

- 17. Park J. J. and Yang L. T. and Lee C. Future Information Technology: 6th International Conference on Future Information Technology, FutureTech 2011, Crete, Greece, June 28–30, 2011. Proceedings. Springer, 2011. P. 89–90. 526 p.
- 18. Рутледж Д. Энциклопедия практической электроники [пер. с англ.] М.: ДМК Пресс, 2002. С. 249–250.
- 19. Ronzhin A., Vatamaniuk I., Pavluk N. Automatic control of robotic swarm during convex shape generation // Electrical and Power Engineering (EPE). 2016 International Conference and Exposition on. IEEE. 2016. C. 675–680.
- 20. Vatamaniuk I. et al. Convex Shape Generation by Robotic Swarm //Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2016 International Conference on. IEEE, 2016. C. 300–304.
- 21. Ronzhin A. L., Saveliev A. I., Budkov V. Y. Context-aware mobile applications for communication in intelligent environment // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking. Springer Berlin Heidelberg, 2012. C. 307–315.
- 22. Ronzhin, A., Saveliev, A., Basov, O., Solyonyj, S. Conceptual Model of Cyberphysical Environment Based on Collaborative Work of Distributed Means and Mobile Robots // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer International Publishing, 2016. C. 32–39.
- 23. Vatamaniuk I., Levonevskiy D., Saveliev A. & Denisov A. Scenarios of Multimodal Information Navigation Services for Users in Cyberphysical Environment // International Conference on Speech and Computer. Springer International Publishing, 2016. C. 588–595.
- 24. Saveliev A. I. Optimization algorithms distribution streams of multimedia data between server and client in videoconferencing application // Trudy SPIIRAN. 2013. T. 31. P. 61–79.
- 25. Saveliev A. I., Ronzhin A. L. Algorithms and software tools for distribution of multimedia data streams in client-server videoconferencing applications // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. T. 25. No. 3. P. 517–525.

УДК 004.932

С. М. Соколов*

доктор физико-математических наук, профессор

А. А. Богуславский*

доктор физико-математических наук

Н. Д. Беклемишев*

кандидат физико-математических наук *Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ¹

Описывается технология разработки программного обеспечения систем технического зрения реального времени. Эта технология основана на использовании унифицированного программного каркаса. Каркас представляет собой заготовку приложения, реализующего ввод и обработку зрительных данных в реальном времени. Этот каркас позволяет оперативно выполнить доработку для использования в конкретных прикладных задачах и ориентирован на обработку зрительных данных в реальном времени.

Ключевые слова: системы технического зрения, системы реального времени, каркас программного обеспечения, обработка зрительных данных.

S. M. Sokolov*

Ds. Sc. Phys.-Math., Professor

A. A. Boguslavsky*

Ds. Sc. Phys.-Math.

N. D. Beklemishev*

Ph.D. Phys.-Math.

*Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS

REALTIME VISION SYSTEMS SOFTWARE FOR MOBILE AND MANIPULATION ROBOTS

The article describes the technology of realtime vision systems software development. This technology is based on the unified software framework. The framework is an application prototype that implements the input and processing of visual data in real time. This framework allows to quickly perform the specialization for use in specific applied tasks. It's focused on realtime visual data processing.

Work was partially supported by the grant RFBR №16-08-01282.

Keywords: vision systems; realtime systems; software framework; realtime image processing

В различных областях деятельности все более активизируется спрос на автоматизацию сбора и обработки зрительных данных. Особенно эта активизация заметна в робототехнике. Наша работа в этом научном направлении посвящена использованию компьютерного видения или системам технического зрения.

В современном этапе развития робототехники можно выделить следующие тенденции:

- переход к практическому использованию СТЗ не в макетных образцах, а в тиражируемой продукции (беспилотные автомобили, БЛА и т. п.);
- возрастание роли и стоимости программного обеспечения как в процессе разработки робототехнических комплексов, так и в составе самих РТК.
- требования экономической целесообразности проводимых разработок.

 $^{^{1}}$ Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ №16-08-01282.

Опираясь на собственный и мировой многолетний опыт исследований и разработок в области компьютерного видения и, откликаясь на перечисленные тенденции, мы разработали методическую и практическую основу выполнения разработок в области систем технического зрения реального времени в целом и, главное, в их программном обеспечении. Эта работа посвящена описанию крупномасштабного каркаса программного обеспечения как основы среды создания систем технического зрения реального времени.

Обзор программных средств для ввода и обработки зрительных данных

В области ввода и обработки зрительных данных известен ряд программных средств, представляющих собой повторно используемые компоненты для использования в приложениях обработки зрительной информации. Среди этих программных средств есть как коммерческие, так и открытые для свободного использования программные продукты.

Существующие программные средства для ввода и обработки зрительных данных можно разделить на две категории: библиотеки с реализацией алгоритмов обработки изображений и программные пакеты для ввода и обработки зрительных данных в интерактивном режиме.

В настоящее время широкую известность получили ряд библиотек, предлагаемых в качестве инструментальных средств для решения задач машинного и технического зрения. Большинство таких библиотек являются коммерческими продуктами, поставляемыми без исходных текстов. Тем не менее, они могут представлять интерес для разработки прототипов систем технического зрения.

Библиотека *Matrox Imaging Library* (MIL) содержит функции для ввода зрительных данных с помощью фреймграбберов фирмы *Matrox* и функции для обработки изображений [1].

Среди характерных особенностей MIL можно отметить эффективную реализацию алгоритмов для корреляционного поиска полутоновых шаблонов. Функции библиотеки оптимизированы для процессоров фирмы *Intel*.

Библиотека LeadTek LeadTools [2] в основном предназначена для хранения и доступа к изображениям в различных файловых форматах. Поддерживаются полутоновые, цветные и бинарные файловые форматы (более 50). Предоставляется доступ к AVI-файлам, интерфейсу TWAIN для сканирования изображений. Функции обработки представлены в относительно небольшом количестве, и они предназначены, в основном, для решения задач визуализации изображений.

Библиотека *HALCON* – это коммерческий вариант системы обработки изображений *HORUS*,

разрабатывавшейся с 1988 по 1996 г. для UNIX в рамках исследований в области интерактивной обработки изображений в Мюнхенском техническом университете [3, 4].

HALCON содержит более 900 функций. Библиотека предназначена для использования в Windows и в нескольких версиях UNIX (в том чисде Linux, Solaris, IRIX). Для Windows есть вариант библиотеки с поддержкой СОМавтоматизации для использования не из Си++, например, из Visual Basic. Версия Parallel HALCON автоматически использует многопроцессорные возможности в соответствующих ОС и поддерживает написание программ для параллельной обработки изображений.

Предполагаемые области использования библиотеки *HALCON* —производственная автоматизация, контроль качества, бесконтактные измерения, обработка аэрофотосъемок, обработка медицинских изображений.

Библиотека Intel OpenCV представляет попытку разработки открытого стандарта в области инструментальных средств для задач машинного и технического зрения [5]. Библиотека поставляется с исходными текстами, но для хранения изображений и низкоуровневой обработки OpenCV использует библиотеку Intel Image Processing Library (IPL), которая распространяется в двоичном виде [6]. В OpenCV имеются группы функций, предназначенных для решения типовых прикладных задач, например, распознавание жестов и слежение за объектами на последовательности изображений (на примере слежения за лицом оператора ПК с помощью Web-камеры). В качестве характерных особенностей *OpenCV* можно отметить реализацию набора алгоритмов для формирования контурных описаний бинарных изображений, алгоритм калибровки камеры и алгоритмы совмещения стереоизображений.

Функциональные возможности обработки изображений в перечисленных библиотеках довольно похожи. Коммерческие продукты (все, за исключением OpenCV, но которая тоже базируется на закрытом продукте IPL) дороги (порядка 5000-10000 долл.) и закрыты для модификации. Основной интерес, на наш взгляд, описанные библиотеки могут представлять на этапе проектирования и разработки прототипа СТЗ реального времени, поскольку дают возможность с относительно небольшими временными затратами изучить возможности применения известных алгоритмов для решения конкретной задачи. В случае найденных удачных решений может быть целесообразно перенести сформированный прототип на собственную алгоритмическую базу.

Для разработки алгоритмов обработки изображений, выполняемого в цикле реального времени СТЗ, могут применяться интерактивные пакеты для ввода и обработки зрительных данных. Часто подобные пакеты разрабатываются на основе библиотек функций обработки изображений, например, Matrox Inspector и Matrox Design Assistant на базе MIL [7], HDevelop [8] и ActivVisionTools на базе HALCON [9].

Характерные черты рассматриваемых интерактивных пакетов — наличие встроенного интерпретируемого языка, возможности применения алгоритмов обработки изображений из реализованного набора как к целому изображению, так и в пределах областей интереса различной формы. Обычно реализуются возможности поиска маркеров — краев и линий, измерение расстояний между маркерами. В некоторых средах алгоритмы можно применять и без программирования на встроенном языке, выбирая соответствующие команды из меню.

Пакет MathWorks MATLAB представляет собой среду для решения задач численного моделирования с собственным встроенным Сиподобным языком. Для этого пакета разработаны модули расширения, ориентированные на решение типовых задач в различных прикладных областях. Для обработки зрительных данных особенно интересны два модуля - модуль обработки изображений и модуль компьютерного зрения. Функционально содержимое этих модулей близко к набору функций OpenCV. В отличие от OpenCV, программирование в MATLAB производится на относительно медленном интерпретируемом языке, поэтому с точки зрения использования при разработке СТЗ эта среда может быть полезна для макетирования алгоритмов.

Matrox Inspector является интерактивным программным пакетом для научных и промышленных задач технического зрения. Предназначен для ОС Windows. Рассчитан на использование фреймграбберов фирмы Matrox. Как и базовая библиотека МІL, пакет Inspector ориентирован на анализ плоских изображений. Предусмотрены функции распознавания символов и штрих-кодов.

Программа *HDevelop* является интерактивной средой программирования задач технического зрения, основанную на библиотеке *HALCON* [3]. Это графическая среда с интерпретатором *Basic*-подобного языка, поддерживающим вызов функций библиотеки *HALCON*. *HDevelop* позволяет экспортировать разработанный алгоритм обработки изображений в исходный текст на Си или Си++.

Программные компоненты ActivisionTools [9] также основаны на библиотеке HALCON. Это элементы управления ActiveX, которые можно рассматривать как образцы решения типичных задач обработки изображений с помощью библиотеки HALCON. Элементы ActivisionTools можно встраивать в прикладные СТЗ, и для построения интерфейса пользователя это может быть удобно (учитывая, конечно, что они на английском языке).

Некоторые интерактивные пакеты рассчитаны на разработку алгоритмов обработки изображений в модели потоков данных с применением графических языков программирования. Примеры таких пакетов — AdOculos [10], LabVIEW IMAQ Vision & Vision Builder [11], Pisoft Image Framework [12].

Можно отметить, что все перечисленные пакеты направлены на то, чтобы дать пользователю возможность с наименьшими усилиями применить готовые библиотеки алгоритмов обработки изображений для решения собственных задач. Для работы в реальном времени эти пакеты мало пригодны, но они существенно ускоряют макетирование циклов обработки изображений. Интерактивные пакеты также удобны для ознакомления с алгоритмами обработки, которые могут присутствовать в них в довольно большом количестве. Технологии СОМ-автоматизации (в частности, оформление компонент обработки изображений в виде элементов управления ActiveX) направлены на то, чтобы пользователи могли обращаться к готовым библиотекам из Visual Basic и других сред-клиентов СОМ-автоматизации.

В пакетах интерактивной обработки изображений (AdOculos [10], LabVIEW IMAQ Vision & Vision Builder [11], Pisoft Image Framework [12]) используются графические языки для представления алгоритмов обработки изображений.

В настоящее время не имеется однозначных теоретических или экспериментальных обоснований, позволяющих говорить о несомненном превосходстве графической формы представления алгоритмов. Применительно к разработке алгоритмов обработки зрительных данных для СТЗ реального времени затруднительно указать набор метафор, применение которых позволило бы упростить разработку алгоритмов с использованием графических языков. По этой причине поддержка графических языков представления алгоритмов в интерактивных пакетах обработки изображений не может рассматриваться в качестве решающего преимущества по сравнению с использованием программных компонентов, доступных в традиционных языках программирования с текстовым представлением исходного текста программ.

Каркас программного обеспечения систем технического зрения реального времени (ПО СТЗ)

Мы разработали методическую и практическую основу выполнения разработок в области систем технического зрения реального времени в целом и, главное, в их программном обеспечении.

Каркас ПО СТЗ предназначен для упрощения процесса разработки ПО СТЗ реального времени посредством повторного использования решений однотипных задач обработки зрительных дан-

ных. Однотипные задачи были выделены в результате анализа опыта проектирования и разработки большого ряда прикладных СТЗ.

Каркас позволяет выполнять обработку цветных и полутоновых изображений в составе одной СТЗ, выполнять обработку в нескольких полях зрения и разрабатывать распределенные СТЗ, включая использование рециализированных вычислителей для выполнения отдельных алгоритмов обработки.

Понятие каркаса соответствует определению [13], согласно которому под программным каркасом понимается многократно используемая ведущая часть программы, которая в соответствии с программной логикой при необходимости обращается к различным модулям (в том числе повторно используемым) для решения частных подзадач. В таком случае при разработке конкретной программы разработчику необходимо заново написать лишь некоторые из модулей, заполняющих гнезда готового каркаса [13]. Под ведущей частью ПО СТЗ подразумевается фрагмент программной системы, который начинает исполняться в момент запуска ПО СТЗ.

В [14] выделены следующие основные достоинства применения каркасов при разработке ПО на основе объектно-ориентированного подхода.

- 1. Обеспечение модульности модульность ПО обеспечивается за счет скрытия деталей реализации устойчивых интерфейсов. Таким образом удается локализовать влияние прогнозируемых изменений на этапах проектирования и реализации ПО. Эта локализация упрощает поддержку разработанного ПО.
- 2. Повторная используемость за счет построения общих компонентов, которые без изменений могут использоваться в новых приложениях, а также за счет использования готовой архитектуры с предопределенным поведением компонентов ПО.
- 3. Расширяемость в каркасе явно предусматриваются точки роста, позволяющие приложениям расширять функциональность с использованием устойчивых интерфейсов. Эти точки роста позволяют отделить устойчивые интерфейсы и поведение системы от изменяемых частей, которые требуется разработать для приложений в конкретных задачах.
- 4. Инверсия программного управления архитектура каркаса на этапе выполнения характеризуется свойством инверсии управления. Это архитектурное решение характеризуется тем, что добавляемые модули содержат обработчики событий, которые вызываются каркасом, непосредственно реагирующим на возникающие события. Когда возникает какое-либо событие, диспетчер в каркасе вызывает соответствующий обработчик или цепочку обработчиков.

Таким образом, добавляемые модули не реагируют непосредственно на возникающие собы-

тия, что позволяет диспетчеру каркаса выполнять обработку событий с использованием цепочек не связанных между собой модулей.

В каркасе предусмотрены не только наборы классов, но и реализована определенная модель взаимодействия объектов этих классов. Эта модель реализована так, что в ней предусмотрены определенные места для добавления новых компонентов — «точки роста» программной системы.

Совокупности взаимодействующих классов этих категорий образуют основные подсистемы ПО СТЗ: интерфейс пользователя, ввод зрительных данных, обработка зрительных данных. Взаимодействие этих подсистем определяется архитектурой ПО СТЗ и это взаимодействие также реализовано в каркасе. Таким образом каркас ПО СТЗ включает в себя реализованные типичные подсистемы ПО СТЗ, содержащие как окончательно реализованные объекты классов, так и объекты, которые должны быть доработаны с учетом требований конкретной прикладной задачи.

Каркас ПО СТЗ имеет многозадачную структуру, основанную на использовании параллельных потоков. Параллельные потоки соответствуют основным подсистемам ПО СТЗ.

Архитектурной особенностью каркаса ПО СТЗ является реализация двух режимов функционирования ПО СТЗ - автоматического режима и режима настройки. В автоматическом режиме ПО СТЗ обрабатывает зрительные данные в реальном времени в соответствии с логикой цикла реального времени СТЗ. В режиме настройки порядок операций СТЗ определяется оператором, этот режим предназначен для регулировки настраиваемых параметров СТЗ, для проверки работоспособности аппаратных устройств и просмотра результатов, полученных в течение сеанса работы в автоматическом режиме. В зависимости от режима работы в ПО СТЗ производится соответствующее конфигурирование потоков, представляющих основные подсистемы ПО СТЗ.

В каркасе ПО СТЗ с целью упрощения переноса ПО СТЗ на другие платформы были выделены платформно-зависимые и платформно-независимые компоненты. К платформно-зависимым относятся компоненты, связанные с работой с аппаратными устройствами и взаимодействием с операционной системой. К платформно-независимым относятся компоненты, обеспечивающие обработку зрительных данных. Интерфейс между платформно-зависимыми и платформно-независимыми компонентами построен на основе использования класса «Изображение».

Анализ опыта разработки информационного обеспечения мобильных платформ позволяет заключить, что после апробации и отладки алгоритмического обеспечение повышение скорости обработки и сокращение энергопотребления возможно за счет применения специализирован-

ных вычислителей. Например, подобный подход на базе FPGA используется в стереоскопических системах компьютерного зрения для марсоходов [15]. Для унификации оборудования в рамках одной платформы компанией Basler (Германия) предлагается комбинированный подход с применением графических процессоров для обучения нейронных сетей и FPGA модулей для вычислений с обученными сетями на целевых платформах [16].

Представление объектов-алгоритмов обработки зрительных данных в каркасе ПО СТЗ

Высокоуровневые алгоритмы обработки зрительных данных в ПО СТЗ выполняют обработку, ориентированную на решение конкретной прикладной задачи. Эти алгоритмы применяются в двух режимах работы ПО СТЗ — в автоматическом режиме и в режиме настройки. При работе в автоматическом режиме выполняется обработка последовательности поступающих цифровых изображений. Поэтому в классе, представляющем высокоуровневый алгоритм, предусматривается хранение результатов обработки последовательности изображений и некоторых вспомогательных данных, например, параметров алгоритма, которые допускают автоматическую или ручную настройку.

В ПО рассматриваемых СТЗ в высокоуровневых алгоритмах можно выделить набор последовательно выполняемых этапов обработки зрительных данных, успешное выполнение которых приводит к принятию решения об обнаружении образов объектов интереса. Такую структуру алгоритмов обработки можно представить в виде совокупности операций генерации гипотез с последующей верификацией. Между различными этапами обработки возможна обратная связь, например, по результатам поиска объекта интереса на полном изображении после успешного обнаружения возможно сокращение области поиска на последующих кадрах с учетом прогноза движения объекта.

Высокоуровневые алгоритмы, в которых обработку можно представить в виде совокупности операций, в процессе которых элементарные признаки изображения объединяются в признаки более высокого уровня с учетом априорной информации об объектах интереса, можно рассматривать в качестве алгоритмов со структурой «обработка снизу-вверх».

В случае, если СТЗ выполняет обнаружение и слежение за объектами интереса, в рассматриваемых СТЗ применяется комбинация высокоуровневых алгоритмов со структурой «обработка снизу-вверх» и «обработка сверху-вниз».

При первоначальном поиске без прогноза и априорной информации о расположении объекта

применяется алгоритм в стиле «обработка снизувверх». Сначала выделяются элементарные характерные признаки на всем изображении. Затем они группируются в кластеры для поиска объектов и выполняется попытка найти среди этих кластеров искомые объекты. При обработке последующих изображений расположение объекта интереса может быть спрогнозировано, поэтому СТЗ выполняет переход на алгоритм с «обработкой сверху-вниз».

При этом в предполагаемом месте расположения объекта выполняется последовательность проверок, подтверждающих наличие объекта интереса и уточнение его параметров.

При разработке каркаса ПО СТЗ при выборе способа программного оформления высокоуровневых алгоритмов учитывались описанные особенности высокоуровневых алгоритмов обработки — то, что в зависимости от результатов обработки предыдущих изображений могут применяться различные алгоритмы; что в процессе выполнения высокоуровневого алгоритма могут выполняться операции по генерации и проверке гипотез, требующие существенных по длительности и представлению в исходном тексте программных операций.

Применительно к структуре каркаса ПО СТЗ у высокоуровневых алгоритмов обработки по результатам решения прикладных задач был выделен набор общих свойств. После обработки порции зрительных данных (изображения, снабженного временной меткой), эти алгоритмы генерируют некоторое числовое или символическое описание изображения — результаты обработки изображения. Алгоритм может использовать результаты обработки предыдущих изображений и содержать набор параметров, которые могут настраиваться оператором и/или разработчиком СТЗ.

Поэтому в класс для представления высокоуровневого алгоритма обработки CAlgPrc были внесены следующие функциональные возможности:

- хранение и доступ к массиву результатов обработки изображений;
- инициализация алгоритма перед началом обработки последовательности изображений;
- обработка очередного изображения последовательности, снабженного временной меткой;
- хранение и доступ к параметрам, влияющим на функционирование алгоритма.

Доступ к перечисленным возможностям оформлен в виде виртуальных функций Си++, вызываемых из каркаса ПО СТЗ.

В прикладной СТЗ, разработанной на базе рассматриваемого каркаса, формируется класс, унаследованный от класса CAlgPrc. Этот унаследованный класс выполняет обработку применительно к решаемой прикладной задаче.

При использовании алгоритмов с обработкой «снизу/вверх» и «сверху/вниз» в прикладной

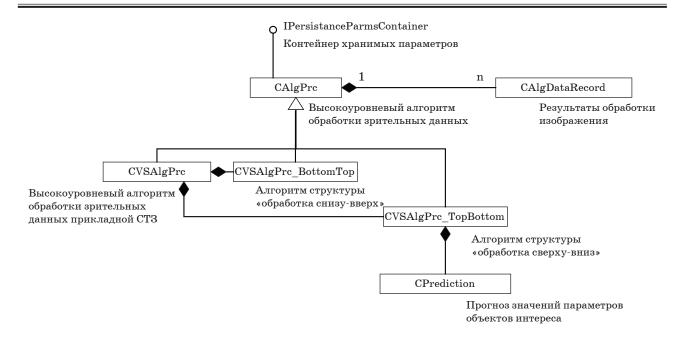


Рисунок. Диаграмма классов для представления высокоуровневых алгоритмов обработки зрительных данных ΠO CT3

СТЗ формируются три класса, унаследованных от CAlgPrc.

Два из этих классов представляют варианты алгоритма с «обработкой снизу-вверх» и с «обработкой сверху-вниз», а третий класс агрегирует их и выполняет диспетчеризацию вызовов со стороны каркаса ПО СТЗ в зависимости от текущего состояния обработки (рисунок).

В статье описывается каркас ПО СТЗ, который представляет собой программу, обеспечивающую основные действия СТЗ по вводу, обработке и представлению зрительных данных. В каркасе ПО СТЗ определены набор абстрактных классов, общая для рассматриваемых СТЗ реального времени программная архитектура, общее поведение, общие структуры данных и общий интерфейс пользователя. Каркас ПО СТЗ предназначен для упрощения решения однотипных задач обработки зрительных данных за счет повторного использования компонентов ПО и проектных решений. Применение каркаса направлено на упрощение модификации и сокращение времени разработки ПО СТЗ.

В ПО СТЗ были выделены алгоритмы обработки зрительных двух типов –низкоуровневые и высокоуровневые алгоритмы. К низкоуровневым алгоритмам были отнесены алгоритмы, которые проектируются и выполняются без учета априорных сведений относительно структуры наблюдаемых сцен. Высокоуровневые алгоритмы проектируются и реализуются применительно к конкретной прикладной задаче, решаемой с помощью СТЗ. Низкоуровневые алгоритмы оформляются в виде функций или классов-оболочек. Для представления высокоуровневых алгоритмов в каркасе ПО СТЗ сформирован базо-

вый класс, от которого в прикладных СТЗ наследуются классы, выполняющие обработку зрительных данных для решаемой прикладной задачи.

Разработанный каркас ПО СТЗ был успешно применен для реализации более 15 прикладных СТЗ реального времени с одним и двумя полями зрения [17, 18].

Библиографический список

- 1. Matrox Electronic Systems Ltd. Matrox Imaging Library 10, 2017. URL: http://www.matrox.com/imaging/en/products/software/mil/(дата обращения: 15.02.2018).
- 2. LEAD Technologies Inc. LEADTOOLS Imaging SDK. Version 19, 2017. URL: https://www.leadtools.com/ (дата обращения: 15.02.2018).
- 3. MVTec Software GmbH. HALCON Machine Vision Library. MVTec Software GmbH. Munich, Germany. 2017. URL: http://www.mvtec.com/products/halcon/ (дата обращения: 15.02.2018).
- 4. Eckstein W., Steger C. The Halcon Vision System: An Example for Flexible Software Architecture // Proc. of the 3rd Japanese Conference on Practical Applications of Real-Time Image Processing. 1999. Pp. 18–23.
- 5. *Kaehler G.*, *Bradski G.* Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library. OReilly Media Inc. 2017. 990 p.
- 6. Intel Corp. Intel Integrated Performance Primitives 2017 Update 2. Developer Reference. Vol. 2: Image Processing. Intel Corp. USA, 2017. 1032 p.

- 7. Matrox Electronic Systems Ltd., Matrox Design Assistant. URL: http://www.matrox.com/imaging/en/products/software/design-assistant-machine-vision-software/ (дата обращения: 15.02.2018).
- 8. *Klinger T.* Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision. Prentice Hall, 2003. 319 p.
- 9. Olson T. J., Klop N. G., Hyett M. R., Carnell S. M. MAVIS: A Visual Environment for Active Computer Vision // Proc. of the IEEE Workshop on Visual Languages. Seattle, Washington, USA. September 15–18. 1992. Pp. 170–176.
- 10. DBS GmbH. AdOculos 4.0, DBS GmbH, Bremen, Germany. 1998. URL: http://www.dbs-imaging.com (дата обращения: 15.02.2018).
- 11. *Klinger T.* Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision. Prentice Hall, 2003. 319 p.
- 12. Pisoft Image Framework 8.0. Институт информационных технологий. М.: Лаборатория компьютерного зрения, 2000. URL: http://www.iitvision.ru/pisoft.htm (дата обращения: 15.02.2018).
- 13. *Горбунов-Посадов М. М.* Расширяемые программы. М.: Полиптих, 1999. 336 с.

- 14. Fayad M. E., Johnson R. E., Schmidt D. C. Building Application Frameworks: Object-Oriented Foundations of Framework Design. USA, New York: John Wiley and Sons, 1999. 688 p.
- 15. *Matthies L*. et al. Computer Vision on Mars. // Int. Journal of Computer Vision. October 2007. No. 75(1). Pp. 67-92.
- 16. Basler AG. Basler Development Kit for Embedded Vision Applications. / Basler AG, Germany, 2016. URL: https://www.baslerweb.com/en/news-press/news/new-basler-development-kit-for-embedded-vision-applications/12238/ (дата обращения: 15.02.2018).
- 17. Boguslavsky A. A., Sokolov S. M. Component Approach to the Applied Visual System Software Development // 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI2003). July 27–30, Orlando, Florida, USA, 2003.
- 18. Sokolov S. M., Boguslavsky A. A., Vasilyev A. I., Trifonov O. V. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring // Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer), 2013. Vol. 208 AISC. Pp. 463–476.

УДК 656.7.08

В. В. Харитонов*

кандидат технических наук, доцент

А. А. Есев*

кандидат технических наук

А. А. Долгов**

соискатель

- *Государственный летно-испытательный центр имени В. П. Чкалова
- **Центральный научно-исследовательский институт военно-воздушных сил Минобороны России

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНТЕРАКТИВНОГО РЕЧЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ И КИБЕРФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В АВИАЦИИ

Изложены психофизиологические аспекты интерактивного речевого взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами в авиации в условиях фонового помехового воздействия авиационного шума.

Ключевые слова: авиационная эргатическая система, взаимодействие с робототехнической системой, взаимодействие с киберфизической системой, речевой интерфейс, речевой канал связи.

V. V. Kharitonov*

PhD Tech., Associate Professor

A. A. Esev*

PhD Tech.

A. A. Dolgov**

Competitor

- *State Flight Test Center named after V. P. Chkalov
- **Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of Russia

PSYCHOPHYSIOLOGICAL ASPECTS OF INTERACTIVE SPEECH INTERACTION WITH ROBOTIC AND CYBERPHYSIC SYSTEMS IN AVIATION

The article describes the psychophysiological aspects of interactive speech interaction with robotic and cyberphysical systems in aviation in the conditions of background noise interference of aircraft noise.

Keywords: aviation ergatic system, interaction with the robotic system, interaction with the cyberphysical system, speech interface, voice communication channel.

В системах управления сложными динамическими объектами человек является одновременно самым сильным и самым слабым звеном, что проявляется при осуществлении интерактивного взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами в авиации [1–3]. Способность человека оперативно решать задачи, не поддающиеся автоматизации, делают его самым сильным звеном, но присущие человеку эмоциональность, утомляемость, ограничения по восприятию и переработке информации делают его самым слабым звеном системы управ-

ления динамическим объектом [1]. Установлено, в частности, что ошибочные и несвоевременные действия персонала при управлении сложными техническими объектами вызывают до 40% неблагоприятных исходов при испытаниях ракет, более 60% тяжелых происшествий на транспорте, до 80% аварий и катастроф в авиации [1].

Эффективность профессиональной деятельности оператора по качеству его функционирования при осуществлении интерактивного взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами в авиации, точности и

своевременности действий, по достижению поставленных задач, т. е. по конечному результату деятельности, характеризуются профессиональной надежностью [1, 4]. В работах [4, 5] разработана концепция потенциальной ненадежности действий (ПНД) как вероятностной меры степени влияния на оператора физико-химических факторов.

Интенсивность и время действия вредных факторов в большинстве современных динамических системах достигают значений, при которых возникает эффект рассогласования между физическими, психофизиологическими возможностями оператора и потребными для выполнения работы определенного уровня сложности и напряженности имеющимися средствами деятельности [5]. Проявление этого эффекта оказывает негативное влияние на эффективность функционирования оператора в системе «оператор – динамический объект – внешняя среда» и создает потенциальную возможность срыва предписанных ему действий [4–7].

Одной из наиболее распространенных причин снижения профессиональной надежности оператора авиационных эргатических систем является превышение на рабочем месте допустимых уровней механических факторов (шума, инфразвука, вибрации) [6-8]. Состояние условий труда является основной причиной, оказывающей наиболее существенное влияние на состояние профессионального здоровья операторов [2-4]. Исследование в этом направлении приобретает актуальность в связи с тем, что шум и вибрация занимают ведущее место среди всех производственных вредных факторов. Удельный вес рабочих мест, не соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям по шуму на промышленных предприятиях и транспорте, составляет 19,9% [8].

Высокая акустическая нагрузка на операторов в процессе выполнения профессиональной деятельности должна рассматриваться как риск надежности оператора авиационной эргатической системы [5]. Проведенные расчеты показали, что для прогнозирования влияния шума на профессиональную надежность можно использовать изложенный подход.

В диапазоне от 80 до 110 дБА зависимость величины ПНД с уровнем звука имеет полого восходящий вид [5]. Указанный диапазон уровня звука в большинстве случаев соответствует акустической обстановке на рабочих местах операторов, осуществляющих взаимодействие с робототехническими и киберфизическими системами в авиации.

Неблагоприятное влияние шума на функциональную надежность человека хорошо изучено, актуальность и практическая значимость подобных исследований очевидна как для получения объективной оценки возможности снижения функциональной надежности операторов, осуществляющих взаимодействие с робототехническими и киберфизическими системами, обусловленной шумовым фактором, так и для обоснования требуемых шумозащитных характеристик защитного снаряжения операторов.

Одним из актуальных направлений совершенствования технологий управления эргатическими системами является создание систем, позволяющих осуществлять управление робототехническими и киберфизическими системами с помощью естественного языка - речевых команд [9-11]. Для разработки таких систем важно получить объективные характеристики акустической обстановки на рабочих местах операторов. Имеющиеся к настоящему времени оценки характеристик акустической обстановки на рабочих местах получены, как правило, косвенными методами (экстраполяцией данных, измеренных в салонах воздушных судов и на авиационных тренажерах) [4, 12]. Регистрация показателей акустической обстановки непосредственно в полете была затруднена как «некомпактностью» шумоизмерительного оборудования на рабочих местах операторов, так и тем, что характеристики шумоизмерительного оборудования не удовлетворяли требованиям к измерительному оборудованию, разрешенному к применению при осуществлении интерактивного взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами в авиации по соображениям безопасности [13, 14].

Шум, недостаточно сильный, чтобы вызывать ухудшение слуха, может нарушить речевой контакт и препятствовать восприятию других полезных звуковых сигналов. Такого рода внешнее шумовое воздействие отрицательно сказывается на эффективности операторской деятельности, особенно у тех категорий, где важное место отводится речевой связи и функционального состояния органа слуха. Поэтому повышается вероятность количества ошибочных действий и предпосылок к нештатным ситуациям.

В качестве основного показателя помехового действия шума рекомендовано использовать уровень помехи речи. Степень разборчивости речи является одним из важнейших показателей помехового действия шума и учитывается при нормировании. При уровне помехи речи более 75 дБА разговорная речь может осуществляться на расстоянии 0,3 м очень громким голосом и с ограниченным запасом слов, а телефонная связь в таких условиях практически невозможна [1, 4].

Для качественного и эффективного выполнения полетного задания и безопасности полетов важное значение имеет радиосвязь. Возможности летчиков ограничены тем, чтобы принимать и перерабатывать речевую информацию, что обусловлено характером распределения внимания.

В результате восприятие информации ухудшается. Повышение сенсорной нагрузки по слуховому каналу у оператора обусловлена наличием в кабине речевых информаторов и речевых информационных сообщений, т. е. одновременно он должен воспринимать несколько речевых сообщений.

Установлено, что эффективность использования речевых информаторов в значительной степени зависит от правильности организации подачи речевого сообщения в потоке штатных речевых сигналов [9, 15, 16]. Приоритетность приема оператором предупреждающих (аварийных) команд на фоне других сообщений достигается повышением их интенсивности, изменением частотного спектра речевого сигнала в область более высоких частот, тренировкой и др., что повышает надежность высокого качества приема.

Вместе с тем возможность операторов воспринимать речевую информацию при наличии шума интенсивностью свыше 90 дБА существенно ограничена.

Необходимо учитывать и ряд факторов, способствующих еще большему ухудшению восприятия речевого сигнала. Во-первых, это развитие у операторов (с возрастом и длительного стажа работы) ухудшения слуха за счет повышения постоянного смещения порогов слышимости, т. е. развития нейросенсорной тугоухости (НСТ), что еще больше затрудняет восприятие речевой информации [8]. Во-вторых, само непосредственное воздействие шума на центральную нервную систему (ЦНС) приводит к снижению функциональных и адаптационных возможностей организма за счет развития утомления [4, 8].

Отрицательное влияние на восприятие звукового сигнала человеком может быть связано с феноменом маскировки звука. Маскировка звука - это физиологическое явление, состоящее в повышении порога слышимости этого звука под влиянием других звуков, одновременно с ним действующих. Максимум эффекта получается, когда маскирующая и маскируемая частоты близки. Чем выше уровень маскирующего шума и чем больше энергии он содержит на речевых частотах ($500-2000 \Gamma$ ц), тем больше будет доля (в процентах) звуков речи, которые не могут быть услышаны. Этот феномен имеет место при выполнении деятельности на всех этапах, так как в спектре авиационного шума всегда присутствуют максимум на частотах 500 - 2000 Гц [8, 12].

Эффект маскировки звука присущ и инфразвуку. Влияние низких частот на речевую связь — это процесс, в котором один из двух одновременно звучащих звуков делает неразличимым другой звук. Установлено, что маскирующим эффектом обладают звуки низких частот при уровнях звукового давления свыше 100—115 дБ. При этом маскирующий эффект распространялся

на полосу частот до 4000 Гц. К тому же появление вибрации мягкого неба, задней стенки глотки, грудной клетки при действии низких частот свыше уровня 115 дБ приводило к серьезным трудностям для речевой связи [4, 8].

Таким образом, механизмы мешающего действия шума в отношении речевой связи проявляются тремя основными способами. Речевой сигнал может маскироваться или «тонуть» в шуме, повышение порогов слышимости под влиянием шума может ухудшить индивидуальную способность понимать сообщение и вибрация органов и тканей, в том числе анатомических структур, обеспечивающих формирование голосового сигнала.

Представленные данные показывают, что на рабочих местах операторов шум соответствуют интенсивному (свыше 80 дБА) и высокоинтенсивному (свыше 100 дБА) уровням. Следовательно, такой шум обладает эффектами, способными ухудшать речевую связь и восприятие звукового сигнала, что может стать причиной [3–5]: вопервых, несчастных случаев на производстве изза неспособности работников услышать сигналы или крики, предупреждающие об опасности; вовторых, ухудшения быстрого и точного приема речевых сигналов; в-третьих, возникновения раздражения из-за пропуска нужной информации, а значит вероятности ошибочных действий.

Из всей совокупности не биологических раздражителей, действие которых испытывает на себе человек в его повседневном окружении, шум относится к самым распространенным и способным вызывать нервно-психические расстройства [4, 8]. Результаты анонимного анкетирования показали, что наиболее значительными неблагоприятным производственным и социальным фактором является шум. Длительное действие его способно вызывать у человека целый комплекс неприятных субъективных ощущений в виде жалоб на головную боль, головокружение, ухудшение слуха, ощущение дискомфорта, снижение внимание, утомление, нарушение сна и др. Такое разнообразие жалоб указывает на изменение функционального состояния ЦНС [6-8].

К отрицательным эмоциональным реакциям на шум можно отнести такие реакции как раздражение, неприятное чувство, испуг, страх, гнев. Эмоциональное раздражение на шум трудно прогнозировать, так как характер и степень реакций человека зависит как от параметров шума, так от сопутствующих факторов (настроение, общее самочувствие, ситуационная обстановка и др.). Среди них важное место занимают особенности субъективного восприятия и психологические качества личности. Изменения функционального состояния организма и работоспособности при действии шума определяются силой нервной системы. Лица с высокой подвижностью нервных процессов более устойчивы

к шуму, а у лиц с низким уровнем отмечаются негативные изменения показателей ЦНС. В основе устойчивости к шуму лежит не столько выносливость нервной системы и высокая подвижность, сколько сбалансированность индивидуально-типологических особенностей и уровень гармоничности личностных черт [8, 12].

Раздражение от шума можно определить как неприятное чувство (ощущение дискомфорта). Способность шума вызывать раздражение зависит от интенсивности, спектра и их изменений во времени. Отмечаются значительные различия в индивидуальных реакциях на один и тот же шум. Принято считать, что воздействие шума уровнем более 55 дБА у большинства людей будет вызывать значительное психологическое раздражение, которое повышается при увеличении его интенсивности. Резко усиливается раздражение от шума, когда он препятствует полезной деятельности и мешает отдыху. Неожиданное действие высокоинтенсивного шума может сопровождаться испугом [8].

Наличие низких частот и инфразвука в спектре авиационного шума может усугублять неблагоприятное действие шума на психику человека в связи с тем, что их биологическое действие имеет сходство. У человека при действии инфразвука наблюдаются разнообразные жалобы (слабость, чувство страха, вибрацию внутренних органов, шум в ушах, модуляцию звуков и речи, утомление, тошноту и др.) [18–20].

Таким образом, авиационный шум оказывает достаточно разнообразное негативное влияние на психику человека, что может приводить к снижению функциональной надежности операторов, осуществляющих взаимодействие с робототехническими и киберфизическими системами. При выполнении большинства простых заданий ущерба от шума практически не бывает, а если появляются признаки изменения поведения, то они незначительные и носят преходящий характер. Обусловленные шумом нарушения проявляются при сложных заданиях, связанных с координацией рук, оценкой времени, одновременным выполнением нескольких задач, и экстремальных условиях, особенно при дефиците времени на принятие решения. В большинстве случаев нарушение выражается не столько в снижении скорости выполнения задания, сколько в увеличении количества ошибок.

Результаты исследования показывают необходимость разработки и реализации специальных средств и методов обеспечения акустической безопасности профессиональной деятельности операторов, осуществляющих взаимодействие с робототехническими и киберфизическими системами, как неотъемлемой части системы обеспечения безопасной эксплуатации робототехнических и киберфизических систем в авиации.

Библиографический список

- 1. Бодров В. А., Орлов В. Я. Психология и надежность: человек в системах управления техникой. М.: ИП РАН, 1998. 288 с.
- 2. Ушаков И. Б., Богомолов А. В., Драган С. П., Солдатов С. К. Методологические основы персонифицированного гигиенического мониторинга // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т. 51. № 6. С. 53–56.
- 3. *Богомолов А. В., Кукушкин Ю. А.* Автоматизация персонифицированного мониторинга условий труда // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 3. С. 6–8.
- 4. Ушаков И. Б., Богомолов А. В., Кукушкин Ю. А. Физиология труда и надежность деятельности человека. М.: Наука, 2008. 318 с.
- 5. Ушаков И. Б., Кукушкин Ю. А., Богомолов А. В., Карпов В. Н. Потенциальная ненадежность действий оператора как характеристика степени влияния физико-химических факторов условий деятельности // Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 1. С. 24–29.
- 6. Зинкин В. Н., Сомов М. В., Пенчученко В. В., Харитонов В. В., Шешегов П. М. Критериальная значимость потенциальной ненадежности действий в исследованиях профессиональной работоспособности авиационных специалистов // Транспортный вестник. 2017. № 2. С. 14–31.
- 7. Зинкин В. Н., Харитонов В. В., Шешегов П. М. Потенциальная ненадежность действий критерий оценки работоспособности авиационных специалистов и эффективности средств защиты от шума // Проблемы безопасности полетов. 2017. № 7. С. 3–16.
- 8. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Шешегов П. М., Харитонов В. В., Чуманов Ю. А. Шум как фактор риска снижения работоспособности и профессиональной надежности авиационных специалистов // Проблемы безопасности полетов. 2014. № 8. С. 3–28.
- 9. Ронжин А. Л. Математические модели и средства многомодального интерактивного вза-имодействия с робототехническими и киберфизическими системами // Математические методы в технике и технологиях ММТТ. 2016. \mathbb{N} 11(93). С. 64–71.
- 10. Ронжин А. Л., Басов О. О., Соколов В. В., Юсупов Р. М. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 11. С. 897–905.
- 11. Larkin E., Bogomolov A., Gorbachev D., Privalov A. About approach of the transactions flow to poisson one in robot control systems // Lecture Notes in Computer Science. 2017. T. 10459 LNAI. C. 113–122.
- 12. Авиационный шум и риск снижения надежности действий летного состава / В. В. Ха-

- *ритонов, Р. Р. Кленков, В. В. Пенчученко* и др. // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 1. C. 32–38.
- 13. Богомолов А. В., Драган С. П. Метод акустической квалиметрии средств коллективной защиты от шума // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96. № 8. С. 755–759.
- 14. Zhdanko I. M., Zinkin V. N., Soldatov S. K., etc. Fundamental and applied aspects of preventing the adverse effects of aviation noise // Human Physiology. 2016. T. 42. № 7. C. 705–714.
- 15. Ларкин Е. В., Богомолов А. В., Антонов М. А. Буферизация данных в системах управления роботами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. N 9–1. С. 117–127.
- 16. Ларкин Е. В., Богомолов А. В., Привалов А. Н. Методика оценивания временных интервалов между транзакциями в алгоритмах сжатия речевых сообщений // Научно-техническая информация. Сер. 2. Информационные процессы и системы. 2017. № 9. С. 23–28.

- 17. *Рахманенко И. А., Мещеряков Р. В.* Анализ идентификационных признаков в речевых данных с помощью GMM-UBM системы верификации диктора // Тр. СПИИРАН. 2017. № 3 (52). С. 32–50.
- 18. Жданько И. М., Зинкин В. Н., Богомолов А. В., Шешегов П. М. Организация контроля и мониторинга инфразвука на различных видах транспорта // Проблемы безопасности полетов. 2015. № 7. С. 43-59.
- 19. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Богомолов А. В., Драган С. П. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука // Технологии гражданской безопасности. 2015. Т. 12. \mathbb{N} 1. С. 90–96.
- 20. Солдатов С. К., Богомолов А. В., Драган С. П., Кукушкин Ю. А. Средства и методы персонифицированного акустического мониторинга // Газовая промышленность. 2015. № 7(725). С. 79–81.

УДК 658.3

Г. С. Армашова-Тельник*

кандидат экономических наук, доцент

М. В. Канавцев*

кандидат экономических наук, доцент

В. А. Сердитов*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

НОВЫЕ ЗНАНИЯ И КОМПЕТЕНЦИИ, ВОСТРЕБОВАННЫЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В статье описываются изменения на современных производственных рынках, связанные в первую очередь с автоматизацией, цифровизацией и диверсификацией технологических предприятий. Выстроены взаимосвязи между трансформациями и способностью технологических предприятий реализовывать стратегию, опираясь на готовность и способность персонала к квалифицированным действиям. Предложена «карта развития компетенций», описаны основные тренды компетентностной трансформации и перечислены наиболее приоритетные компетенции на ближайшую перспективу.

Ключевые слова: компетенции, цифровизация, квалификация, технологические решения, повышение квалификации, промышленность, карта развития компетенций.

G. S. Armashova-Telnik*

PhD, Econ., Associate Professor

M. V. Kanavcev *

PhD, Econ., Associate Professor

V. A. Serditov *

PhD. Tech., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

NEW KNOWLEDGE AND COMPETENCES DEMANDED BY TECHNOLOGY COMPANIES

The article describes the changes in modern production markets, associated primarily with automation, digitalization and diversification of technology-based businesses. Built the relationship between the transformations and the technological capacity of enterprises to implement the strategy based on the willingness and ability of the staff to competent actions. At the end of the article proposed "map of competences", described the main trends of the competence of transformation and listed the highest priority competency in the near future.

Keywords: competences, digitalization, skills, technological solutions, training, industry, map of competences.

Стремительное развитие цифровой экономики и следующая за ней цифровизация производств многое меняет в принципах построения информационных и логистических связей, кадровой политики, выполнения операционных задач и технологических решений внутри всех производственных компаний.

Между тем значительный износ производственных мощностей российских предприятий, мораль-

ное устаревание оборудования, ориентация на сырьевую модель экономики, применение энергозатратных, а порой малоэффективных технологических решений в российских производственных компаниях значительно усложняет возможность конкуренции с зарубежными. Кроме того, остро стоит вопрос повышения квалификации и переобучения кадров с учетом перехода многих сфер жизни и производства на «цифровые рельсы».

Поэтому одной из задач топ-менеджмента и владельцев предприятий, желающих удержаться на «цифровой волне», является обучение сотрудников новым компетенциям и повышение эффективности технологических решений до уровня шестого технологического уклада, с учетом современных подходов в энергоэффективности, ресурсосбережении и цифровой индустрии.

Происходящий переход инфраструктуры, управленческих моделей, технологического оснащения предприятий в шестой технологический уклад, ведет за собой существенное, перманентное преобразование требований к компетенциям персонала. Фундаментальной научной задачей, на решение которой направлено исследование, является выработка алгоритма обеспечения устойчивого кадрового сопровождения трансформационных процессов, происходящих на современных российских технологических предприятиях.

Существующие научные изыскания проводятся, как правило, по отдельным направлениям трансформации государства, промышленности и общества в новых условиях цифровой экономики. Связано это может быть с тем, что разработку программы «Цифровая экономика» Президент РФВ. В. Путин в своем обращении к Федеральному собранию поручил Правительству Российской Федерации совместно с Администрацией Президента Российской Федерации относительно недавно — в декабре 2016 г., определив срок до 01.07.2017 г. Правительство разработало программу «Цифровая экономика Российской Федерации» и утвердило распоряжением от 28.07.2017 № 1632-р [1].

Согласно п. 2.8.3 (Программы «Цифровая экономика») к IV кварталу 2020 г. компании цифровой экономики законодательно имеют возможность опираться исключительно на модель компетенций при принятии кадровых решений, до этого момента необходимо объяснить собственникам, управляющим и работникам высокотехнологичных производств о принципах функционирования «цифровой экономики» и необходимости повышения своих компетенций до нормативных требований, на что и направлена практическая часть исследования.

В большинстве современных публикаций рассматриваются вопросы, во многом связанные с экономическими или технологическими преобразованиями на производственных предприятиях, без учета преобразований в кадровой политике.

Наиболее полно заявляемая проблематика описана в научном докладе С. Ю. Глазьева на научном совете РАН по комплексным проблемам евразийской экономической интеграции, конкурентоспособности и устойчивому развитию Российской академии наук 29 января 2013 г. «Стратегия опережающего развития и интеграции на основе становления шестого технологического уклада» [2]. В докладе рассматривается измене-

ние спроса на специалистов, необходимых для создания перспективной инфраструктуры для развития цифровой экономики, делаются выводы о совокупном увеличении спроса на специалистов, не смотря на массовые сокращения рутинных рабочих мест, при условии развития цифровой экономики на отечественной интеллектуально-технологической базе.

«Если проводимая государством политика в сфере информационных технологий не изменится, и в ее основе будет лежать импорт техники и программного обеспечения, то эффект может оказаться и сильно отрицательным. Высвобождаемые специалисты, в основном из сферы услуг и производства, могут не найти себе новой специальности как из-за отсутствия должной квалификации, так и вследствие наполненности растущих сегментов российского рынка импортной техникой и иностранными специалистами». Одной из базовых проблем в научном докладе выделяется узкоспециализированность работников и неготовность переобучаться и постоянно дообучаться (в первую очередь цифровым технологиям).

Для обеспечения трудоустройства подобных категорий граждан потребуются значительные усилия по переквалификации, что тоже в решающей степени зависит от государственной политики.

При условии нацеленности технологических компаний Российской Федерации на повышение конкурентоспособности, развитие производственных мощностей, увеличение стратегических зон хозяйствования, необходимо выполнение ряда задач, направленных на создание эффективной системы совершенствования кадрового потенциала.

Среди первоочередных задач необходимо выделить следующие.

- 1. Анализ системы переподготовки и повышения квалификации кадров в промышленности в условиях цифровой экономики.
- 2. Анализ технологических решений на промышленных предприятиях в России и за рубежом и степени их адаптации к новым условиям 6-го технологического уклада.
- 3. Разработка подходов к адаптации кадровой политики российских технологических предприятий к цифровой экономике.
- 4. Разработка системы норм, нормативов и рекомендаций для деятельности Национального агентства развития квалификаций и Центра оценки квалификации, в рамках реализации Федерального закона «О независимой оценке квалификации» от 3 июля 2016 г.

Анализ литературных источников по проблематике новых знаний и компетенций, востребованных на технологических предприятиях, можно выявить, что возникли и набирают обороты ряд тенденций, среди которых:

принципиальные изменения почти во всех профессиях;

- появления новых профессий, «демаркации» прежних;
- возрастания роли горизонтальной мобильности в течение трудовой жизни;
- профессионализации высшего образования (стирания граней между классическими академическими и прикладными профессиями);
- возникновение феномена массового и «всеобщего» высшего образования;
 - глобализация профессий и профессионалов;
- нарастание в системах профессионального образования конвергентных процессов;
- децентрализация экономической ответственности и ответственности за качество работы;
- наращивание горизонтальной иерархии организаций;
- развитие адекватной системы профессионального образования всех уровней и ступеней (гибкость, прозрачность, сравнимость/сопоставимость, расширение «образования в течение всей жизни»);
- усиление роли и усложнение задач «личностного развития» («умения на всю жизнь»);
- изменение стилей жизни на разных уровнях:
 глобальном, социума, организационном, индивидуальном;
- внедрение «рыночных механизмов» в высшее профессиональное образование;
- утверждение подходов «менеджеризма» в управлении профессиональным образованием;
 - активизации малого предпринимательства;
- расширение фактора динамизма и неопределенности.

Становится очевидным факт того, что новая, цифровая экономика предъявляет новые требования к работникам предприятий, выпускникам учебных заведений, среди которых все большее внимание уделяется требованиям к знаниям о системах экспертного характера, коммуникативных, принятия управленческих решений, сбора и обработки статистических данных, управления производственными процессами. С другой стороны, усложняющиеся характер решений, их диверсифицированное проникновение в целый ряд производственных цепочек и реактивный характер, требуют от исполнителей нового качества рефлекторных, самоорганизующихся, моральных начал, а также способности успешно организовывать деятельность в широком социально-экономическом и культурном контексте.

Эта тенденция отражается в том, что повышенная познавательная и информационная деятельность, начатая в современном производстве, не «покрывается» традиционной концепцией профессиональной квалификации [3].

В мире подготовки и переподготовки специалистов технологических предприятий складывается новая культура, уже в краткосрочной перспективе влияющая на эффективность и прогрессивность предприятия на динамичном рынке.

Господствовавшие до конца двадцатого столетия образовательные концепции должны быть обновлены. Современные образовательные технологии внедрения и развития компетенций по проектному принципу подходят для решения оперативных задач предприятия (краткосрочная перспектива), во всех других случаях осуществляется либо технологический шпионаж, либо переманивание специалиста, имеющего необходимый опыт; либо технология продается совместно с командой специалистов, сопровождающих технологию. Во всех случаях — данная стратегия не является опережающей.

Массовая автоматизация, цифровизация и роботизация технологических предприятий, их диверсификация и интернационализация, несомненно, порождают ряд принципиально новых проблем. Процесс выстраивания политики предприятия, нацеленной на долгосрочные цели и способной реализовывать стратегию должен опираться на готовность и способность персонала целесообразно действовать в соответствии с требованиями дела, методически организованно и самостоятельно решать задачи и проблемы, а также самооценивать результаты своей деятельности [4].

Понимание руководителями технологических предприятий роли своевременно, а часто упреждающе совершенствующихся навыков специалиста в цифровой экономике, дает возможность выстраивать устойчивость предприятия на рынке. Важный момент — это понимание технологических вызовов, необходимость формирования цифровых навыков и, в частности, понимание вызовов к заводской инфраструктуре. Большое внимание необходимо уделять разработке корпоративных программ по формированию фундаментальных, базовых и прикладных навыков, а также построению гибких образовательных стратегий посредством разработки карт развития компетенций специалистов (табл. 1).

Перспектива освоения компетенций разбита в соответствии с задачами компании на краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный периоды (оперативное, тактическое и стратегическое, соответственно). Каждый период подразделяется на 3 категории от 8 до 1024 ч (по продолжительности) в зависимости от сложности освоения программы [5].

Матрица карты развития компетенций заполняется по мере выстраивания стратегии предприятия, заключенных соглашений, по мере внесения в план средств на образование, так и в соответствии с внесением в план новых направлений развитий. Каждая образовательная программа прорабатывается применительно к шести категориям сотрудников:

1) специалисты производственных отделов (специалисты и инженерно-технические работники, занятые непосредственно в производстве);

Карта развития компетенций специалистов технологических предприятий

Классификация		Перспектива освоения компетенций							
специалистов	К	раткосро	чные	Среднесрочная			Долгосрочная		
технологических предприятий	8-32	64-128	256-1024	8-32	64-128	256-1024	8-32	64-128	256-1024
Производственные отделы									
Научно-исследовательские отделы									
Отдел испытаний и проектирования									
Управленцы									
Рабочие									
Сопровождающий персонал									

- 2) специалисты научно-исследовательских отделов (научные сотрудники и специалисты, занятые в сфере научно-исследовательских работ);
- 3) специалисты отделов проектирования и испытаний (инженерно-технические работники, занятые в сфере опытно-конструкторских работ);
- 4) управленцы (руководители рабочих групп, отделов, управлений, департаментов и высшее руководство предприятия);
- 5) рабочие (сотрудники рабочих профессий техники, операторы, аппаратчики);
- 6) сопровождающий персонал (бухгалтерия, логистика, охрана, юристы).

Не являясь консервативной статистической моделью, карта развития компетенций, по согласованию должна модернизироваться целым рядом сотрудников в зависимости от размера и структуры управления на технологическом предприятии. Обычно ответственность по обучению кадрового состава делегируется кадровым службам, также в нее могут включаться психологи, работники отделов обучения, руководители подразделений и дочерних компаний организации. При этом руководители чаще отвечают за определение потребностей в обучении и отправку на обучение работников своего ведомства, в свою очередь специалисты кадровых служб, психологи и специализированные отделы по обучению несут ответственность за подготовку и реализацию программ обучения для разных категорий персонала. В условиях агрессивной цифровизации предприятий роли наставников должны исполнять не руководители структурных подразделений (как раньше), а представители копаний - носителей технологии, так как именно они оказываются компетентными в новой для предприятия сфере.

Ранее практиковался опыт, когда многие российские и зарубежные компании имели собственные учебные центры и этим достигался максимальный как экономический эффект, так и уровень профессиональной подготовки кадров. Но сегодня эффективные внутренние учебные центры могут позволить себе только широко диверсифицированные компании с высокой маржинальностью, и наличием собственных научно- ис-

следовательских и аналитических отделов, такие как Coca-Cola, Сбербанк, Центробанк, ЛУКОЙЛ. Так, на одном из инновационных технологических предприятий Санкт-Петербурга ОАО «НПО «Сатурн»», имеющем в своем распоряжении научную и образовательную базу, в рамках программ повышения квалификации инженерных кадров за 2016-2017 гг. были определены следующие приоритеты обучения и повышения квалификации специалистов: «Объемное моделирование, проектирование и расчет малых эмиссионных камер сгорания ГТД», «Технологии виртуального проектирования и испытаний авиационных и морских ГТД», «Автоматизация и роботизация производства деталей ГТД», «Проектный менеджмент в авиадвигателестроении» и «Программно-проектное управление на основе международного стандарта РМВоК на авиадвигателестроительном предприятии».

На крупных технологических предприятиях, не имеющих полноценной образовательной и научной инфраструктуры («Волжский оргсинтез», «Курскрезинотехника», «Пермнефтеоргсинтез» и мн. др.) учебные центры перепрофилировались на подготовку специалистов по рабочим специальностям, так как обучением специалистов осуществляется работниками предприятия и для этого задействуется уже имеющаяся инфраструктура. Вопросы повышения квалификации и внедрения новых технологий и стандартов на предприятиях отдается учебными центрами подрядным организациям, часто непосредственно связанным с технологией или программным обеспечением внедряемыми или адаптируемыми на предприятии [6].

Как описано выше, трансформации спектра наиболее приоритетных компетенций в условиях активной цифровизации, часто не связана только с внутренними потребностями предприятия, а во многом является реакцией на внешние измени и потребности рынка.

На сегодняшний день можно выявить ряд трендов, существенно влияющих на трансформацию потребностей технологических компаний в дообучении и переподготовке кадров, среди них:

- 1. Роботизация и автоматизация большинства технологических производств, прежде всего, в развитых странах.
- 2. Увеличение скорости и мобильности сбора и обработки информации о производственных процессах и кадрах на предприятиях.
- 3. Постепенный переход интеллектуального труда из традиционных офисов в онлайн-пространство.
- 4. Снижение роли человеческого фактора в строительстве, логистике (внедрение беспилотной техники) и на производстве.
- 5. Разработка и внедрение нейроинформационных технологий, подключение к процессу выработки и принятию управленческих решений экспертных систем.
- 6. Развитие платформ SMATR, Block Chain, BIM, ERP и CRM.
- 7. Перенос опасных вредных производств в страны, не способные занять лидирующие позиции в мире.
- 8. Трансформация методологии и идеологии управления в корпоративных и государственных структурах.
- 9. Энергоэффективность и перевод технологических решений на более экономичные и экологичные источники энергии.

Итак, переход экономики в шестой технологический уклад детерминирует необходимость вырабатывать необходимый спектр требуемых предприятию компетенций в соответствии с вышеназванными требованиями. Данный вопрос должен решаться комплексно, в первую очередь через совершенствование системы планирования на предприятии и модернизации системы стандартов в подготовке и переподготовке специалистов. В рамках данного перехода необходимо также проведение мероприятий по развитию новых технологических подходов к обучению и выстраиванию договорных отношений с коммерческими и государственными образовательными учреждениями с целью создания сетевых форматов образования [7].

Отвечая на главную проблему, заявленную в названии статьи, перечислим компетенции, востребованные на технологических предприятиях, в условиях перехода к шестому экономическому укладу: аналитическая компетенция; овладение новыми производственными технологиями; актуализация инженерно-технического знания и навыков; способность создавать междисциплинарные команды и работать в них; овладение современными видами коммуникаций; умение работать с огромным массивом информации (когнитивная компетенция); готовность к постоянному совершенствованию и саморазвитию.

Таким образом, решение производственных и социальных задач связано с трансформацией и развитием на новых принципах систем планирования процесса повышения компетенций персо-

нала. Переход в шестой технологический уклад, перспективы, открывающиеся перед технологическими предприятиями в условиях экономики знаний, требуют от предприятий освоения новых компетенций и выработки квалификационных моделей работников. Все очевиднее становится необходимость модернизации и системы повышения квалификации и переподготовки специалистов, ориентированной на процесс цифровизации предприятий и промышленности. Подготовка работников, которые должны сыграть решающую роль в переходе к шестому технологическому укладу, осложняется тем, что на рынок выходит новое поколение людей, которое называют поколением DT (date technology).

Данный ресурс, наиболее продвинутый социальный слой (новаторы), являясь одновременно и наиболее дефицитным продуктом на рынке труда — должны создаваться самим предприятием и выстраивая карьерную лестницу, карту развития компетенций в привязке к стратегическим задачам.

- 1. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» Правительство Российской Федерации распоряжение от 28 июля 2017 года N 1632-р URL:http://ac.gov.ru/files/content/14091/1632-r-pdf.pdf (дата обращения: 15.10.2017).
- 2. *Глазьев С. Ю.* Стратегия опережающего развития и интеграции на основе становления шестого технологического уклада // Партнерство цивилизаций. 2013. № 1–2.
- 3. Канавцев М. В. Социальный инжиниринг в информационном пространстве / Сб. науч. тр. международ. науч. практ. конф. «Научное обеспечение развития сельского хозяйства и снижение технологических рисков в продовольственной сфере». 2017. С. 36–39.
- 4. *Israfilov N.T.*, *Popova A.L.*, *Israfilova E.I.*, *Kanavtsev M.V.* Social objects: from the federal to the municipal property / Humanities and Social Sciences in Europe: Achievements and Perspectives 6th International symposium. 2015. C. 290–295.
- 5. Serditov V.A., Kanevcev M.V. Stages of development of human competences / Современный менеджмент: проблемы и перспективы. 2016. С. 193–196.
- 6. Barnet R. Improving higher education: total quality care. SRHE and Open University Press, 1992. (Translated from English).
- 7. Kamalova L. A., Raykova E. The Quality and Criteria of Evaluation of Educational Work at the Universities of Russia at the Contemporary Stage. IEJ-ME Mathematics Education. 2016. № 11 (1). Pp. 71–79. (Translated from English).

УДК 004.832.2

Г. С. Армашова-Тельник*

кандидат экономических наук, доцент

М. В. Канавцев*

кандидат экономических наук, доцент

В. А. Сердитов*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Статья посвящена истории создания и эволюции систем поддержки принятия решений на примере автоматизации управления бизнес-процессами на промышленных предприятиях. Приводится классификация и объем рынка программного обеспечения, применяемого для оптимизации и совершенствования управленческих решений организаций, обозначаются основные угрозы этого рынка (нехватка квалифицированных кадров, отсутствие единых стандартов на программное обеспечение) и способы их разрешения.

Ключевые слова: управление, эволюция, технологический уклад, система поддержки принятия решений, экспертные системы, искусственный интеллект, промышленность, автоматизация, DSS, BI-системы, ERP.

G. S. Armashova-Telnik*

PhD, Econ., Associate Professor

M. V. Kanavcev *

PhD, Econ., Associate Professor

V. A. Serditov *

PhD, Tech., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE EVOLUTION OF DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR MANAGEMENT DECISIONS IN INDUSTRY

In the article there is a speech about the history and evolution of systems of support of decision-making on the example of automation of business processes in industrial enterprises. The classification and market size of the software used to optimize and improve management decisions of organizations, outlines the major threats in this market (lack of qualified personnel, lack of uniform software standards) and ways of resolving them.

Keywords: management, evolution, technological structure, decision support, expert systems, artificial intelligence, industry, automation, DSS, BI system, ERP.

Трансформационные процессы, происходящие в современной промышленности, в том числе российской, связаны с переходом в шестой технологический уклад. Этот уклад предполагает возрастание скорости и объема данных и информации, воздействующих на систему «человек-машина-среда»; цифровизацию, пронизывающую все сферы жизнедеятельности человека; изменение в принципах построения информа-

ционных и логистических связей, кадровой политики; выполнения операционных задач и технологических решений внутри всех производственных компаний.

Технологические уклады — это группы технологических совокупностей, выделяемые в технологической структуре экономики, связанные друг с другом однотипными технологическими цепями и образующие воспроизводящиеся

целостности. Каждый уклад — это целостное и устойчивое образование, в рамках которого происходит полный макропроизводственный цикл, который состоит из добычи и получения первичных ресурсов, всех стадий их переработки и выпуска набора конечных продуктов, удовлетворяющих соответствующему типу общественного потребления [1].

Переход развитых стран к шестому технологическому укладу и, сопутствующая этому переходу, цифровизация производств многое меняет в принципах построения информационных и логистических связей, кадровой политики, выполнения операционных задач и технологических решений внутри всех производственных компаний.

Активное развитие цифровых технологий и искусственного интеллекта (ИИ) подтверждается результатами исследования «Актуальные тенденции рынка машинного обучения и искусственного интеллекта», проведенного компанией «Инфосистемы Джет» и аналитическим центром «TAdviser» на российском рынке. Согласно представленным данным, объем рынка ИИ (АІ) и машинного обучения (МL) в России составит в 2017 г. около 700 млн руб. и вырастет до 28 млрд руб. к 2020 г. Драйверами этого рынка будут финансовый сектор, ритейл и промышленность.

Международные исследования *McKinsey* показывают, что инвестиции в развитие технологий ИИ ІТ-гигантов (*Alibaba*, *Amazon*, *Baidu*, *Google*, *Facebook* и других) в 2016 г. достигли приблизительно 26–39 млрд долл., что в три раза больше, чем в 2013 г. (90 % средств направляется на внутренние R&D-разработки). Финансируют исследования, в первую очередь в области машинного обучения и робототехники, и крупнейшие индустриальные игроки: *ABB*, *Bosch*, *GE*, *Siemens*, а также автопроизводители: *BMW*, *Tesla*, *Toyota* [2].

Между тем, по словам заведующего международным отделом Института социально-экономических проблем народонаселения РАН Константина Андрианова, износ промышленных мощностей в РФ (по состоянию на март 2015 г.) достигает 78% [3]. Кроме того, ориентация на сырьевую модель экономики, применение энергозатратных, а порой малоэффективных технологических решений, и критическая нехватка квалифицированных кадров значительно усложняют возможность конкуренции с зарубежными предприятиями.

По словам главы Российской ассоциации электронных коммуникаций (РАЭК) Сергея Плуготаренко, «отечественной ІТ-отрасли не хватает 400 тыс. специалистов. Через 5–7 лет не будет ни одной профессии, где не нужно знание технологий и умение обращаться с роботом» [4].

Объективно существующему пятому и начинающемуся шестому технологическому укла-

ду присуще увеличение объема информации и усложнение процессов, происходящих в мире, которое обусловливает повышение требований к качеству управленческой деятельности организациями. Основу любой управленческой деятельности составляют решения, которые принимаются единоличными или коллегиальными органами управления, направленные на достижение определенных задач, стоящих перед организацией.

Для обеспечения требуемой эффективности (цены, сроков, затрат, обоснованности, трудоемкости, рисков) формирования и принятия управленческих решений служат системы поддержки принятия решений (Decision Support Systems – DSS) или так называемые BI-системы (Business Intelligence).

Система поддержки принятия решений — это совокупность взаимосвязанных по целям, параметрам и условиям задач программных средств и технических систем, с помощью которых можно автоматически формировать ряд отчетных форм, содержащих информацию для принятия управленческих решений и/или варианты таких решений.

DSS-система состоит:

- 1) из *Data Warehouse* (хранилище данных) позволяет интегрировать информацию, отражающую разные точки зрения на одну предметную область:
- 2) Business Intelligence Tools (инструментальные средства бизнес-анализа) ПО для анализа, интерпретации и использования пользователями больших объемов данных, из которого выделяют:
 - информационно-поисковый (Query Tools);
- оперативно-аналитический с использованием технологии оперативной аналитической обработки данных *OLAP* (*On-Line Analytical Processing*);
- интеллектуальный, путем построения систем интеллектуального анализа, реализующего методы и алгоритмы $Data\ Mining\ Tools$.

Частным случаем DSS-систем являются экспертные системы (ЭС, англ. expertsystem), которые способны частично заменить специалиста-эксперта в разрешении проблемной ситуации. Прообраз экспертных систем был предложен С. Н. Корсаковым в 1832 г., который создал механические устройства (интеллектуальные машины), позволявшие найти решения по заданным условиям [5].

Историческое развитие ВІ-систем, согласно исследованиям аналитической компании IDC, происходило циклами интервалом 15 лет. Первый цикл, 1975—1990 гг., характеризовался созданием отчетов на мейнфреймах. Следующий цикл охватывал промежуток с 1990 до 2005 гг., когда зародилась и развивалась современная эра ВІ-технологий, характеризуемая клиент-сервер-



Puc. 1. Структура ERP систем

ными ВІ-приложениями с последующим перемещением их на Web-платформу. В 2005 г. наступил третий этап, который по прогнозам будет длиться до 2020 г., и основная его направленность — выход технологии на широкий круг пользователей за счет простоты применения и интеграции ВІ в бизнес-процессы [6].

В производственном секторе экономики первоначально для решения задач по управлению предприятиями создавались системы складского и материального учета — *Inventory Control*

(IC), «Контроль запасов» и Material Requirements Planning (MRP), «Планирование материальных потребностей».

Постепенно эти системы трансформировались от локальных к интегрированным, объединяющим все функции управления производством, которые назывались *Manufacturing Resource Planning* (MRP II), «Планирование производственных ресурсов».

Последующее развитие MRP II привело к созданию систем управления предприятием в замкнутом контуре (с обратной связью) – Closed-loop MRP.

Внедрение в эксплуатацию на предприятиях систем MRP II повысило эффективность управления ими, но выявила ряд недостатков этой системы [7]:

- ориентация системы управления предприятием только на существующие заказы, без учета перспектив;
- слабая интеграция с системами автоматизации производства, проектирования и конструирования продукции;
- отсутствие интеграции с функциями управления кадрами и финансами.

Вышеперечисленное послужило мотивом к совершенствованию системы MRP II в системы Enterprise Resource Planning (ERP) (рис.1).

Основные отличия MRP, MRP II и ERP систем [8] приведены в табл. 1.

На российском рынке программного обеспечения ERP-системы занимают крупный сегмент (табл. 2).

Объем российского рынка ERP-систем (продажа лицензий, услуги по внедрению и сопровождению, облачные сервисы) в 2016 г. по данным

	MRP	MRP II	ERP
	-	Bce функции MRP	Все функции MRP II
M III	Управление спецификацией изделия	Управление финансами	Финансовое планирование и моделирование
систем ятиями	Управление запасами	Бизнес планирование	Бизнес планирование и моделирование
функции е	Управление производствен- ными заказами	Планирование ресурсов	Планирование и управление продажами
фунія пре	Составление производственного расписания	Планирование производства	Планирование и управление маркетингом
Основные ф управления	Контроль и управление про- изводством	Планирование продаж	Планирование и управление сбытом
Осн	Управление потребностями в материалах	Управление заказами потре- бителей	Управление ресурсами и моделирование потребностей
	-	Разработка основного плана производства	Управление производством и моделирование производства
	_	Объемное планирование про- изводства	Управление поставками

№ π/π	Компания	Выручка от ERP проектов в 2016 г., млн руб.	Выручка от ERP проектов в 2015 г., млн руб.	Динамика 2016/2015
1	SAP*	20800	19060	9,1
2	1C*	14000	12750	9,8
3	Microsoft*	3700	3390	9,1
4	Борлас	2459,1	2267,7	8,4
5	IBS	1945	1291	50,7
6	Oracle*	1700	1715	-0,9
7	Maykor-GMCS	1549,2	1231	25,8
8	Галактика	1409	1289	9,3
9	AT Consulting	1408,7	1216,6	16
10	Крок	1355	1294,9	4,6
	Сумма	50326,0	45505,2	

Выручка компаний от ERP-проектов в России

TAdviser вырос на 10% и достиг отметки примерно в 119 млрд рублей.

В 2016 г. на рынке преобладали проекты по модернизации и тиражированию ERP-систем. По мнению TAdviser, в 2017 г. рост рынка может достигнуть 12–15%, т. е. увеличиться в объеме до 133–137 млрд рублей.

При этом некоторые эксперты – представители вендоров и интеграторов ERP-систем – ожидают положительной динамики до 30% [9].

В современном мире для автоматизации производственных и бизнес-процессов наиболее часто встречаются следующие технологические программные платформы: ВІ (Business Intelligence), ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System) и SCADA/ACУ ТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами) [10]. Стоит отметить, что MES системы осуществляют контроль состояния и распределения ресурсов, оперативное/детальное планирование, диспетчеризация производства, управление качеством продукции, производственными процессами, техобслуживанием и ремонтом оборудования, а также анализ производительности [11].

Совместное применение перечисленных систем позволяет выстроить жесткую вертикаль управления деятельностью предприятия, начиная от автоматического сбора информации и заканчивая получением сводных аналитических отчетов.

Эти системы также можно соотнести с тремя уровнями управления: стратегический (ВІ, ERP), тактический (МЕS) и оперативный (АСУ ТП).

Одновременное использование этих уровней автоматизации формирует единую информационную среду компании (табл. 2). На уровне АСУ ТП с помощью программируемых логических контроллеров, SCADA-систем и баз дан-

ных, можно вести сбор и обработку технологических данных в режиме онлайн режиме. Далее обработанная информация поступает на уровень MES-систем и используется для оперативного управления производством с учетом взаимозаменяемости и переналадок оборудования. Оперативный план производства MES-систем соотносится с результатами работы ERP-систем по стратегическому планированию и управлению административно-хозяйственными операциями компании. Сводная аналитическая отчетность, полученная на основе транзакционных данных ERP-уровня, определят финальный шаг автоматизации средствами BI-систем с возможностью прогнозирования, учитывая внешние факторы [12].

Рассматриваемый выше перечень систем автоматизации гораздо шире, чем представлен в данной работе, кроме ERP существуют и другие автоматизированные системы предприятия: CRM (Customer Relationship Management) — система управления взаимоотношениями с клиентами, SRM (Supplier Relationship Management) — корпоративная информационная система, позволяющая автоматизировать стратегию компании по повышению эффективности закупочной деятельности и обслуживания клиентов, PLM (Product Lifecycle Management) — система управления жизненным циклом продукта и SCM (Supply Chain Management) — система управления логистической сетью.

Основная проблема, с которой сталкиваются все компании в мире и в России особенно, это выбор постоянно разрастающейся номенклатуры программного обеспечения по автоматизации бизнес-процессов.

Вопрос заключается в совместимости этих программных средств между собой на горизонтальном и вертикальном уровне и интеграции всей корпоративной информационной системы

^{*} по оценке TAdviser

^{**} с учетом данных BI Partner

в единую отраслевую, государственную и мировую информационную систему.

Интеграционные преобразования в современном мировом хозяйстве — естественный процесс, развивающийся как объективное явление. Единообразие промышленного производства и соответствующих ему условий жизни, установление технического, технологического, организационно-управленческого и экономического единства взаимосвязанных промышленных, сельскохозяйственных и других хозяйствующих субъектов предпринимательства — все это составляющие процесса экономической интеграции хозяйствующих субъектов [13].

Сложность интеграции вызвана отстающим темпом роста разработки и утверждения российских государственных стандартов по информатизации бизнес-процессов. Можно, конечно, использовать международные стандарты, как зачастую это и делается, но тогда российская промышленность всегда будет в «хвосте» кометы, потому что стандарты, критерии эффективности и совместимости программных средств будут разрабатывать внешние игроки.

Для безболезненного перехода к новому технологическому витку необходимо пересмотреть действующие стандарты и разработать новые, с учетом стратегии развития отдельных отраслей и всей страны в целом [14].

Уместным здесь будет привести слова директора АНО «Центр СИ» Е. Г. Бессонова о том, что «современный мир — мир кибертехнологий (виртуальной реальности) требует от нас ответа на вопрос не столько о том, как мы будем развивать хозяйство своей территории, сколько о том, какие стратегические цели мы видим в дальнейшем продвижении тех или иных технологий для развития нашего хозяйства» [15].

Для сохранения жизни на планете Земля любые происходящие явления и преобразования необходимо рассматривать комплексно в системе «человек-машина-среда». На данный момент в бизнес-моделях рыночной системы верх взял подход к построению деятельности компаний, при котором приоритет отдается зарабатыванию денег с наименьшими затратами ресурсов. Под эту модель разработано большинство ВІ-систем. Активное распространение этих систем и их интеграция в единую глобальную сеть данных усугубит положение экосистемы Земли и ее обитателей, так как в этой системе главным являются деньги, а не безопасность ныне живущих и последующих поколений людей, флоры, фауны и экологии в целом.

Безусловно, активное внедрение информационных технологий благоприятно влияет на эффективное управление бизнес-процессами, но вместе с плюсами есть и свои минусы.

Существующая экономическая модель при формировании цены на единицу продукции.

Кроме основных и переменных затрат учитывается вред, который наносит производство окружающей среде, что отражается на дополнительных пошлинах (экологическом сборе) в отношении таких предприятий. Но вместе с тем перечень товаров, за который установлен экологический сбор, ограничен Федеральным законом от 31.12.2017 № 503-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления и отдельные законодательные акты Российской Федерации"», которым, в числе прочего, уточняется порядок уплаты экологического сбора.

Так, вред только транспортных средств, наносимый окружающей среде РФ, оценивается в 82—85 млрд руб. ежегодно. По данным Комитета по природным ресурсам, природопользованию и экологии Государственной думы РФ, в России ежегодно выходят из эксплуатации, т. е. требуют утилизации, около 1,5 млн ед. транспортных средств. Таким образом, безвозвратно теряются ценные материалы, которые можно было бы извлекать при организованной системе переработки. К 2020 г. уровень выбытия автомобилей может составить 6% в год с численностью около 3,0 млн ед. в год [16].

Необходимость учета этих расходов обусловлена необратимыми экологическими последствиями, которые терпит окружающая среда вследствие бездарного хозяйствования.

При более глубоком рассмотрении проблемы в структуру затрат предприятий на производство единицы продукции необходимо включать затраты, которые будут идти на восстановление уже «хронически больной» экосистемы, доставшейся нам от предыдущих поколений. Если представить уровень экологической ситуации на планете в виде ряда чисел (-1, 0, 1), то текущее положение экологии можно соотнести с числом -1, а то и меньше.

Следует сделать поправку, что вред окружающей среде наносят не только промышленные предприятия, но и любой другой вид деятельности, для каждого из которых необходимо разработать свои показатели загрязнения окружающей среды. Если вред выбросов и отходов промышленности на окружающую среду принято соотносить с ПДК и ПДУ, то, например, для IT компаний таким критерием может быть объем потребляемой электроэнергии, который будет учитывать первичный вид топлива, используемый для получения этой электроэнергии.

Системы поддержки принятия управленческих решений могут эффективно реализовать заложенные в них человеком алгоритмы, поэтому первоочередная задача — определиться с параметрами будущего, в котором мы хотим жить и наделить ВІ-систему соответствующими критериями.

- 1. Сайт ГлазьевРУ. URL: http://www.glazev.ru/articles/6-jekonomika/54923-velikaja-tsifrovaja-revoljutsija-vyzovy-i-perspektivy-dlja-jekonomiki-i-veka (дата обращения 08.01.2018).
- 2. Artificial intelligence the next digital frontier? McKinsey Global Institute, Июнь, 2017 года. Сайт Wi-fi. URL: http://wi-fi.ru/desktop/news/1/1898648 (дата обращения 16.01.2018).
- 3. Голова U. Поддержка не по адресу // Российская Бизнес-газета Промышленное обозрение. 2015. № 990 (11).
- 4. Сайт Известия. URL: https://iz.ru/615970/rossiiane-smogut-besplatno-pereobuchitsia-v-internete (дата обращения 09.01.2018).
- 5. Дошина А. Д. Экспертная система. Классификация. Обзор существующих экспертных систем // Молодой ученый. 2016. № 21. С. 756–758.
- 6. Пучков Е. В. Методы и системы поддержки принятия управленческих решений // Деловой аналитический журнал «Ваш Капитал Юг». $2008. \ \mathbb{N} 6-7.$
- 7. Поздняков В. Я. Производственный менеджмент. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. С. 401–442. URL: http://znanium.com/bookread2. php?item=appx&book=431767 (дата обращения 14.01.2018).
- 8. Сайт Менеджмент качества. URL: http://www.kpms.ru/Automatization/ERP_system.htm (дата обращения 10.01.2018).

- 9. Сайт Tadviser. URL: http://www.tadviser.ru/index.php. (дата обращения 15.01.2018).
- 10. Гвоздева Т. В., Баллод Б. А. Проектирование информационных систем. Ростов H/Д.: Феникс, 2009. 508 с.
- 11. Фролов Е. Б. MES-системы, как они есть или эволюция систем планирования производства (часть II). URL: http://www.fobos-mes.ru/stati/mes-sistemyi-kak-oni-est-ili-evolyutsiyasistem-planirovaniya-proizvodstva.-chast-ii.html (дата обращения: 15.01.2018).
- 12. *Степанов Д. Ю.* Интеграция ERP и MESсистем: взгляд сверху. // Современные технологии автоматизации. 2016. №2. С. 108–111.
- 13. *Канавцев М. В.* Влияние процессов экономической интеграции на систему менеджмента качества предприятия // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 37. С. 88–92.
- 14. Сердитов В. А. Становление индустрии 4.0 в условиях цифровой экономики России // Вестник факультета управления СПбГЭУ. Вып. № 1 (Ч. 2). 2017. С. 400–404.
- 15. Сайт АНО «Центр СИ». URL: http://centersi.com/analitics/kiberbezopasnost-perexod-ot-problem-ekonomiki-k-algoritmam-kulturnogo-koda/ (дата обращения 20.01.2018).
- 16. Козлов А. В., Теренченко А. С., Миренкова Е. А. Методика расчета затрат на утилизацию транспортных средств, вышедших из эксплуатации / Сб. тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. \mathbb{N} 4 (106). С. 306–312.

УДК 347.44

К. В. Киреев

ведущий специалист Департамента технологического присоединения Исполнительного аппарата ПАО «МРСК Центра»

ОСОБЕННОСТИ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПРОЦЕДУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ

Рассмотрены ключевые законодательные акты, регламентирующие процедуру технологического присоединения к электрическим сетям, описаны основные преференции, предусмотренные действующим законодательством Российской Федерации для льготной категории заявителей (заявители до 150 кВт), а также приведены наиболее значимые и существенные предложения по внесению изменений в законодательство Российской Федерации в части корректировки процедуры технологического присоединения с целью оптимизации организационного, финансово-экономического и технико-технологического аспектов технологического присоединения.

Указанные в статье предложения могут быть использованы при изменении положений нормативных правовых актов.

Ключевые слова: технологическое присоединение к электрическим сетям, договор об осуществлении технологического присоединения, заявитель, категории заявителей, плата за технологическое присоединение.

K. V. Kireev

Leading specialist Section of organization technological connection Department of technological connection Executive office of the IDGC of Centre, PJSC

ANALYSIS OF THE LEGISLATION OF THE RUSSIAN FEDERATION AND PROPOSALS FOR CHANGING THE PROCEDURE OF TECHNOLOGICAL CONNECTION TO ELECTRIC NETWORKS

The article describes main legislative acts regulating the procedure of technological connection to electric networks, describes main preferences provided for a preferential category of customers (customers under 150 kW), as well as the most significant and essential proposals for amending the legislation of the Russian Federation with regard to adjusting the procedure for technological connection for optimization organizational, financial and economic, technical and technological aspects of technological connection. The proposals mentioned in this article can be used for changing the provisions of normative legal acts.

Keywords: technological connection to electric networks, agreement on technological connection; the customer; categories of customer; payment for technological connection.

Процедура технологического присоединения к электрическим сетям регламентируется актами законодательства Российской Федерации, к которым относятся: Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»; «Правила технологического присоединения...», утвержденные постановлением Правительства РФ от 27.12.2004 № 861; Постановление Правительства Российской Федерации от 04.05.2012 № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии»; Постановление Прави-

тельства РФ от 29.12.2011 № 1178 «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике», другие нормативные правовые акты Российской Федерации. Ввиду регулярно вносимых изменений в законодательство РФ, в том числе имеющих отлагательное условие, необходимо определить, что информация и сведения настоящей статьи актуальны на 01.01.2018 и в дальнейшем могут утратить актуальность по причине изменения положений законодательства.

Технологическим присоединением называется процедура присоединения энергопринимаю-

щих устройств заявителя к электрическим сетям сетевой организации согласно заключенному между указанными сторонами договору об осуществлении технологического присоединения. Заключению договора предшествует процедура подачи заявителем в адрес сетевой организации заявки на технологическое присоединение, регламентируемая п. 8—14 Правил технологического присоединения.

В соответствии с Правилами технологического присоединения заявителями именуются юридические или физические лица, имеющие намерение осуществить технологическое присоединение, увеличить объем максимальной мощности или изменить категорию надежности электроснабжения, точки присоединения, вида производственной деятельности без пересмотра (увеличения) величины максимальной мощности, но с изменением схемы внешнего электроснабжения энергопринимающих устройств. Все заявители в зависимости от величины максимальной запрашиваемой мощности, указываемой в заявке на технологическое присоединение, могут быть разделены на категории (в соответствии с положениями законодательства, с учетом или без учета ранее присоединенной мощности в данной точке присоединения) до 15 кВт, 15–150 кВт, до 150 кВт (включающая обе указанные предыдущие категории), свыше 150 кВт, 150 – 670 кВт, свыше 670 кВт и др.

Категория заявителей до $150~\mathrm{kBT}$ в широком смысле называется льготной, так как действующее законодательство $P\Phi$ для указанной категории заявителей предусматривает ряд преференций, к которым относятся:

1) размер платы за технологическое присоединение составляет не более 550 р. для категории заявителей до 15 кВт включительно (с учетом ранее присоединенной мощности) при соответствии энергопринимающих устройств заявителя третьей категории надежности и условии, что расстояние от границ участка заявителя до объектов электросетевого хозяйства сетевой организации на уровне напряжения до 20 кВ включительно необходимого заявителю класса составляет не более 300 м в городах и поселках городского типа, и не более 500 м в сельской местности [1]. В соответствии с п. 17 Правил технологического присоединения указанной льготой заявитель может пользоваться не более одного раза в 3 года;

2) в отношении юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, являющихся заявителями, имеющими намерение осуществить технологическое присоединение энергопринимающих устройств второй или третьей категории надежности, относящимися к категории 15 – 150 кВт включительно (с учетом ранее присоединенной мощности) законодательством предусмотрена возможность беспроцентной рассрочки плате-

жа в размере 95% платы за технологическое присоединение на период до 3 лет [1];

3) в состав платы за технологическое присоединение не включается инвестиционная составляющая на покрытие расходов сетевой организации по реконструкции существующих объектов электрохозяйства, а также в отношении заявителей категории до 150 кВт в состав платы за технологическое присоединение с 1 октября 2017 г. не включаются расходы на строительство объектов электросетевого хозяйства - от существующих объектов до присоединяемых энергопринимающих устройств заявителей («последняя миля»). В этом случае стоимость технологического присоединения будет определяться только размером ставки С1, включающей в себя затраты сетевой организации на подготовку и выдачу технических условий заявителю, а также на проверку выполнения заявителей технических условий, в том числе получение разрешения органа федерального государственного энергетического надзора на допуск в эксплуатацию, фактическое присоединение объектов заявителя к электрическим сетям и фактический прием (подача) напряжения и мощности, а также составление акта об осуществлении технологического присоединения и акта согласования технологической (аварийной) брони (при наличии) [2, 3, 4].

Таким образом, основные льготы, установленные действующим законодательством для заявителей категории до 150 кВт, предусматривают преимущественно финансово-экономические преференции.

В этих условиях с целью компенсации сетевым организациям потенциально потерянной прибыли в соответствии с приказом ФАС России от 29.08.2017 № 1135/17 изменен порядок расчета платы за технологическое присоединение с использованием стандартизированной тарифной ставки C_1 , которая с 01.01.2018 г. исчисляется в единицах валюты за одно присоединение (руб. за одно присоединение). Тем не менее, в имеющихся условиях с учетом возможности этапного ввода объектов заявителей, межевания земельных участков и других способов снижения и/ или разбиения максимальной мощности энергопринимающих устройств заявителей сетевые организации находятся в крайне уязвимом положении в части потери потенциальной прибыли от услуг по технологическому присоединению. Кроме того, законодательство РФ предусматривает минимальную (условную) ответственность заявителей перед сетевыми организациями за нарушение сроков исполнения обязательств при исполнении договоров об осуществлении технологического присоединения.

На основании изложенного с целью оптимизации процедуры технологического присоединения в части компенсации сетевым организациям предусмотренных законодательством для заяви-

Таблица

Предложения по внесению изменений в законодательство Российской Федерации, регламентирующее технологическое присоединение

<u>№</u> π/π	Сущность предложения (для категорий заявителей до 150 кВт, если иное не указано по тексту предложения)	Аспект процедуры технологического присоединения	Ответ- ственные исполни- тели	Соисполнители	Риски	Степень прора- ботки предло- жения
1	Повышение ответственности заявителей за величину максимальной мощности, в том числе путем введения штрафов за существенное превышение объемов присоединяемой (запрашиваемой) мощности средней величины мощности электропотребления по итогам отчетного периода	Технико-тех- нический	Минэ- нерго России	Сетевые орга- низации	Отсутствие согласования ФАС России; нарушение прав заявителей	Низкая
2	Введение ограничения на частоту и/или условия* осуществления заявителями технологического присоединения при отсутствии в составе платы за технологическое присоединение фактически понесенных сетевыми организациями расходов на строительство объектов «последней мили»	Финансово- экономиче- ский	Минэ- нерго России	Федеральные органы исполнительной власти Российской Федерации (в том числе ФАС России)	_	Высо- кая
3	Увеличение размера платы за технологическое присоединение заявителей категории до 15 кВт (например, до 2500 р.) или снижение максимального значения запрашиваемой мощности заявителей данной категории (например, до 5 кВт) со ступенчатым увеличением платы до 15 кВт (550 р. за 1 кВт с 5 кВт до 15 кВт)	Финансово- экономиче- ский	Минэ- нерго России	Федеральные органы испол- нительной вла- сти Российской Федерации	Снижение сущности льготы; сокращение количества заявителей льготной категории до 15 кВт	Высо- кая
4	Поэтапный переход оформления и сопровождения организации процедуры технологического присоединения (подача заявки, оформление и подписание договора и т.д.) к электронной форме посредством личного кабинета заявителя (потребителя) на сайтах сетевых организаций	Организаци- онный	Минэ- нерго России, сетевые органи- зации	_	Отсутствие согласования ФАС России; нарушение прав заявителей в части выбора способа подачи заявки, оформления договора и т.п.	Средняя
5	Создание единого унифицированного справочника, позволяющего однозначно определить тип каждого из мероприятий со стороны сетевых организаций (реконструкция, строительство или др.), предусмотренных техническими условиями к договору об осуществлении технологического присоединения	Технико-тех- нический	Минэ- нерго России (вклю- чая под- ведом- ственные органи- зации)	Сетевые орга- низации	_	Высо- кая
6	Законодательное закрепление обязанности сетевых организаций проведения информационно-консультационной работы с заявителями, включая направление деятельности «энергоюрист», в том числе на официальных сайтах сетевых организаций по принципу «одного окна»		Минэ- нерго России, сетевые органи- зации	_		-

^{*} под «условиями» понимаются устанавливаемые законодательством критерии, например, расстояние от существующих электрических сетей необходимого заявителю (и указанного в заявке на технологическое присоединение) класса напряжения до границ участка, на котором расположены присоединяемые энергопринимающие устройства заявителя, составляет не более 300 м в городах и поселках городского типа, и не более 500 м в сельской местности и/или другие критерии

телей категории до $150~\mathrm{kBT}$ льгот и преференций при изменении отдельных положений нормативных правовых актов $P\Phi$, целесообразно рассмотреть предложения по внесению изменений в законодательство $P\Phi$, представленные в таблице, предварительно осуществив более глубокую проработку каждого из предложений.

Таким образом, положения данной статьи, содержащей предложения по внесению изменений в законодательство РФ, следует рассматривать в качестве информационного материала, рекомендуемого к изучению с целью понимания одной из ключевых проблем технологического присоединения в целом, а также с целью последующего формирования и внесения в федеральные органы исполнительной власти (в частности, Минэнерго России) предложений по корректировке нормативных правовых актов, регламентирующих процедуру технологического присоединения к электрическим сетям.

- 1. Правила технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям, утвержденные Постановлением Правительства РФ от 27.12.2004 № 861. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51030/0229a0f33f2ad77fa7e997af53909d9e eb80fe60/ (дата обращения: 15.01.2018).
- 2. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/(дата обращения: 15.01.2018).
- 3. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.12.2011 № 1178 «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике». URL: http://www.fstrf.ru/press/news/1338. (дата обращения: 15.01.2018).
- 4. Приказ ФАС России от 29.08.2017 № 1135/17 «Об утверждении методических указаний по определению размера платы за технологическое присоединение к электрическим сетям». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_280977/ (дата обращения: 15.01.2018).

УДК 620.9

В. А. Семёнова*

кандидат экономических наук, доцент

К. Д. Свешников*

студент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОСОБЕННОСТИ И ТРЕБОВАНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭНЕРГОАУДИТА СОЦИАЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Рассмотрены основные требования и особенности проведения энергетического обследования социальных организаций.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективность, энергоаудит.

V. A. Semenova*

PhD, Econ., Associate Professor

K. D. Sveshnikov*

Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE CHARACTERISTICS AND REQUIREMENTS OF ENERGY AUDITS OF SOCIAL ORGANIZATIONS

Describes the main requirements and peculiarities of carrying out energy surveys of social organizations. **Keywords:** energy Saving, energy efficiency, energy audit.

Рациональное использование и потребление энергетических ресурсов является одним из самых важных направлений модернизации и совершенствования экономики в технологическом развитии современного мира. В связи с этим трендом перед государством стоит важнейшая задача устранения потерь потребляемой электрической и тепловой энергии и необходимость выявления причин возникновения причин убытков. Поэтому одним из самых перспективных и актуальных аспектов энергоменеджмента в нашей стране является энергетическое обследование (энергоаудит), направленное на выявление нерациональных потерь энергии и затрат энергетических ресурсов. Мероприятия, указанные выше, необходимо проводить в каждом секторе производства и услуг, для достижения положительных результатов.

Для различных секторов производства и назначения энергетическое обследование несет общее назначение — повышение энергоэффективности, но имеет различную специфику, свойственную каждому из секторов.

В промышленном и аграрном секторе — энергетическое обследование направлено на снижение потерь энергетических ресурсов до экономически обоснованных значений и приводит

к значительному уменьшению энергетической составляемой в себестоимости готовой продукции, а значит и к повышению конкурентоспособности на российском и мировом рынках. Особенно важно выполнение этих условий для предприятий, которые занимаются данным производством, распределением и транспортировкой энергетических ресурсов.

Для жилищно-коммунального хозяйства первоочередной задачей энергетического обследования является рационализации потребления жилищно-коммунальных услуг и проведения работ по повышению энергетической эффективности зданий, сооружений и коммуникаций, что позволит сдерживать рост платежей потребителей за услуги ЖКХ.

В социальном секторе, с помощью энергетических обследований возможна экономия средств, которая, в свою очередь, позволит перераспределить большую часть бюджета и ресурсов. Статус программ энергосбережения должен стать даже выше, чем у программ развития коммунальной инфраструктуры, так как коммунальные системы могут развиваться одновременно и с помощью энергосбережения, и создания новых мощностей.

Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» является главным регламентирующим документом. В данном законе сформулированы специальные требования для каждого из этапов подготовки и проведения энергетических обследований и повышения энергетической эффективности в целом, которые направлены на повышение значимости экономии энергии для ее потребителей, поставщиков и производителей. При энергетическом планировании снижение потребления энергоресурсов и увеличение мощности систем энергоснабжения рассматриваются как неразрывные процессы, протекающие в совокупности друг с другом.

Исходными материалами при этом должны быть данные, полученные в результате энергетического обследования. Таким образом, энергетическое обследование (энергоаудит) является одним из главных инструментов энергосбережения в различных секторах экономики страны, так как энергетические затраты имеют самый высокий потенциал снижения в сравнении с другими расходными статьями большинства предприятий и организаций [3].

Требования к проведению энергетического обследования

- І. Общие положения
- 1. Зоны распространения требований к проведению энергоаудита и его результатов. Данные требования обязаны соблюдаться саморегулируемыми организациями (далее СРО), а также лицами, являющимися членами СРО (далее энергоаудиторы), которые имеют право проводить энергетические обследования.
- 2. Выполнение энергетического обследования возлагается на энергоаудиторов в соответствии с правилами и стандартами, регламентирующими порядок проведения энергоаудита членами СРО. Энергетическое обследование может быть добровольным и обязательным. Энергоаудит обязателен для организаций и предприятий, установленных согласно ФЗ №261 от 23 ноября 2009 г.
- 3. При добровольном энергетическом обследовании лицо, заказавшее услуги по проведению энергоаудита (далее заказчик), определяет объем выполняемых работ, согласно с заключенным договором по оказанию услуг по проведению энергетического обследования.
- 4. Перечень строений, зданий и сооружений, энергопотребляющего оборудования, объектов электроэнергетики, источников тепловой энергии, тепловых сетей, систем централизованного теплоснабжения, централизованных систем холодного водоснабжения и (или) водоотведения, вентиляции и иных объектов системы коммунальной инфраструктуры, технологических про-

цессов, в отношении которых должны быть проведены мероприятия по энергосбережению, связанные с измерением объекта энергетического обследования и направленные на сбор необходимых данных, а также оценку эффективности использования энергетических ресурсов и воды (далее – инструментальное обследование), и (или) сведения, о которых должны быть отражены в отчете, определяется заказчиком в договоре.

Полный перечень всех зданий и сооружений, а также оборудования, тепловых и электрических сетей, систем тепло-, электро- и водоснабжения, различных систем, используемых на предприятии или учреждении, в отношении которых должны быть использованы мероприятия по повышению энергоэффективности должны быть отражены в отчете и определяются заказчиком в договоре.

- II. Требования к проведению энергетического обследования
 - 1. Подготовительный этап, который включает:
 - разработку и заполнение опросных форм;
 - определение стоимости;
 - разработку технического задания;
 - заключение договора.
- 2. Этап проведения энергетического обследования:
 - инструментальный;
 - документальный.
 - 3. Этап анализа результатов, включающий:
 - анализ показателей энергоэффективности;
 - анализ потенциала энергосбережения;
- анализ проведенных энергосберегающих мероприятий;
 - составление отчета;
 - составление энергетического паспорта.
 - 4. Заключительный этап:
 - оформление работ у Заказчика;
 - оформление работ в СРО.

Особенности проведения энергоаудита социальных организаций

Системы теплоснабжения

Являются одними из самых потенциально энергосберегающих систем. Благодаря энергетическим обследованиям с последующими выполнениями основных мероприятий по повышению энергоэффективности возможно сохранить порядка 15–20%.

В ходе энергетических обследований в системах теплоснабжения главными мероприятиями являются:

- восстановление неработающих приточных вентиляционных установок;
- промывка и гидравлическая регулировка системы теплоснабжения;
- системы автоматического регулирования тепловой энергии (CAPT), которая позволит снизить теплопотребление до 15%;

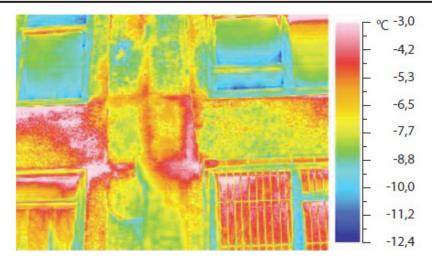


Рис. 1. Термограмма объекта 1980-х гг. постройки

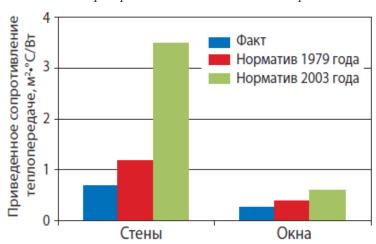


Рис. 2. Типичное состояние ограждающих конструкций зданий социальных организаций 1980-х гг. постройки

 установка приборов коммерческого учета и контроля текущих параметров теплоносителя.

В некоторых случаях удается находить мероприятия, которые требуют минимальных финансовых вложений, но дающие серьезную экономию. Так, например, для спортивного комплекса с бассейном, в ходе энергетического обследования была выявлена экономия более 1 млн руб. в год, с практически нулевыми капитальными затратами, благодаря выполнению данных мероприятий.

Ограждающие конструкции

Повышение энергетической эффективности используется при строительстве зданий, сооружений и построек. В этой области популярно тепловизионное обследование зданий, которое позволяет обнаружить дефекты тепловой изоляции и позволяет добиться существенной экономии при проведении строительной экспертизы.

В результате тепловизионного обследования ряда школ и медицинских учреждений 1980-х гг. постройки были выявлены несоответствия теплотехнических характеристик ограждающих

конструкций не только современным требованиям, но и требованиям 1980-х гг. (рис. 1, 2).

Решение данной проблемы возможно на нескольких участках.

- 1. Потери на участке производства тепловой энергии (котельные). Для снижения теплопотерь помимо комплексного обследования и режимной наладки котлов, необходимо оборудовать котельную рабочими приборами контроля и регулирования, восстановить теплоизоляцию котлоагрегата.
- 2. Потеря тепла на участке его транспортировки к потребителю (трубопроводы). Одной из главных проблем на данном участке является доступ влаги к трубе, из-за которого происходит коррозия труб. Чтобы его ограничить можно использовать современные изоляционные материалы.
- 3. Потери на объектах потребителей тепла (отапливаемый объект). Установка пластиковых окон позволит повысить температуру в помещении на 3–5%. Для сокращения потерь является целесообразным установка автоматической системы регулирования тепловой нагрузки здания

по погодным условиям, данная система позволит снизить потребления тепла зданием до 30~% при одновременном повышении комфортности в его помещениях.

4. Современные требования ставят задачи максимального снижения теплопотерь ограждающих конструкций. Согласно СНиП II-3—79 «Строительная теплотехника» необходимо постройка трехслойных стен с утеплителем на основе минеральных волокон. При таких конструкциях теплопотери по сравнению с однослойными снижаются на 23—30%.

Электрохозяйство.

Чтобы сделать выводы о состоянии электрохозяйства в социальных организациях, в том числе в сфере образования (школы, детские сады) и здравоохранения (больницы, поликлиники), необходимо провести энергоаудит систем электроснабжения и электропотребления. По результатам энергоаудита с применением точных инструментальных измерений параметров питающей сети и потребителей электроэнергии, были разработаны мероприятия для снижения потребления электрической энергии и повышения ее качества.

Во многих случаях оборудование распределительных щитов, электропроводка эксплуатируются 20–30 и более лет. Резко возрастает вероятность аварийных ситуаций, пожароопасных коротких замыканий, увеличения потерь электроэнергии из-за старения оборудования и изоляции.

В системе освещения сооружений обнаружена большая доля использования ламп накаливания, эта доля составляет примерно 60% расходуемой на нужды освещения электроэнергии. Одна лишь замена ламп накаливания на энергосберегающие лампы позволяет снизить потребление энергии с 60% до 10-12%.

Дроссельные пускорегулирующие аппараты (ПРА) управляют экономичными люминесцентными лампами и потребляют существенное количество электрической энергии и также снижают $\cos j$. В зданиях с большим количеством светильников с дроссельными ПРА коэффициент мощности $\cos j$ падает до 0.7-0.8.

Недостатки дроссельных ПРА:

- ненадежный стартер, в случае выхода его из строя возникает фальстарт лампы, из-за чего сокращается срок службы нитей накала;
 - низкий КПД;
- эффект стробирования (мерцание с частотой сети).

Результаты замены электронных ПРА вместо дроссельных:

- $-\cos j$ возрастает до 0,97-0,98.
- снижение потребления электроэнергии люминесцентными светильниками на 15-20%;
 - увеличение срока службы лампы в 1,5 раза.

В больницах и школах большинство потребителей электроэнергии питаются по однофазной системе электроснабжения. При неравномерном распределении однофазных нагрузок по фазам возникает несимметрия фазных токов, приводящая к возникновению токов, иногда значительных, в нулевом проводе (в контуре заземления) и, в результате чего, возникают дополнительные потери электроэнергии.

Следует обратить внимание на источники света или полупроводниковые преобразователи, которые являются нелинейными приемниками и искажают форму тока, что, в свою очередь, провоцирует появление в сети суммы определенного количества высших гармоник, кратных основной гармонике -50 Γ ц, например, 5-я -250 Γ ц, 7-я -350 Γ ц).

Проблемы, создаваемые высшими гармони-ками:

- снижает срок службы конденсатора из-за перегрева конденсаторов и увеличения тока, проходящего через них
- дополнительная вибрация в двигателях переменного тока;
- дополнительный нагрев, вследствие повышенных потерь в двигателе переменного тока;
- повышенные потери в обмотках и магнитопроводе трансформатора;
- ускоренное старение изоляционных материалов;
- падение напряжения в распределительной сети

Сравнивая форму токов и спектр гармоник (гистограмма), полученных на работающем МРТ (рис. 3а), и системы освещения здания, где использованы люминесцентные лампы (рис. 3б), видно, что амплитуды 3-й, 5-й и 7-й гармоник составляют 10–12% от амплитуды 1-й (основной) гармоники, что является недопустимым по ГОСТу.

Если потребитель обладает небольшой мощностью, то из-за демпфирующего действия питающего трансформатора влияние высших гармоник на связанные сети будет невелико. Однако если рассмотреть обратный случай, то в связанных сетях возможны перегрев и выход из строя трансформаторов, снижение сроков службы оборудования из-за изменения напряжения; сбои в работе систем контроля; ошибки срабатывания автоматических выключателей и пр. В медицинских учреждениях, например, могут выйти из строя достаточно дорогие приборы и аппараты из-за наличия высших гармоник.

Для решения данной проблемы необходимо устанавливать оборудование, подавляющее и потребляющее высшие гармоники:

- активные фильтры (в российских сетях они не используются, но зарубежный опыт показывает эффективность данных устройств);
- разделительные трансформаторы (трансформаторы, первичная обмотка которых отде-

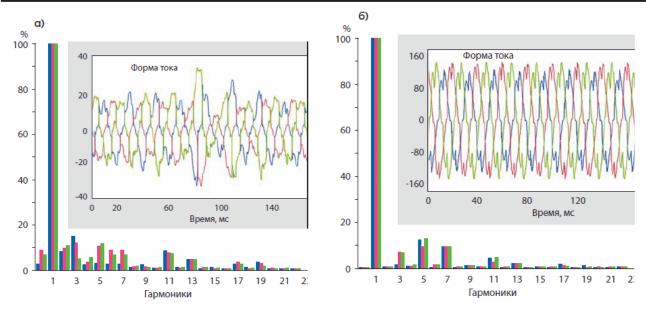


Рис. 3. Форма токов и спектр гармоник (гистограмма) работающего магнитно-резонансного томографа (а); форма токов и спектр гармоник (гистограмма), система освещения здания, где использованы люминесиентные лампы (б)

лена от вторичных при помощи защитного электрического разделения цепей);

- электромашинные преобразователи (установка, состоящая из мощного синхронного двигателя и синхронного генератора, находящегося на одном валу с двигателем, в этом случае происходит полная гальваническая развязка между цепями, так как передача энергии происходит через вал системы «генератор-двигатель»).

Но данная установка имеет малый КПД для потребителей малой мощности, а для потребителей большой мощности КПД будет равен 90%.

Опыт проведения более чем 50 энергетических обследований различных социальных организаций показал, что практически на любом объекте, независимо от его назначения и возраста, энергетическое обследование позволяет сократить энергопотребление в среднем на 23—25%.

Благодаря выполнению всех мероприятий в ходе энергетического обследования возможно существенно сократить невынужденные потери тепловой и электрической энергии. Для соци-

альных учреждений особенно важно снижение потерь энергии, так как данная экономия позволит перераспределить сэкономленные средства и выделить их на необходимые нужды учреждений социальной группы.

- 1. ГОСТ Р 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. М.: Изд-во стандартов, 2000. 11 с.
- 2. Методика проведения энергетических обследований (энергоаудита) бюджетных учреждений / под. ред. С. И. Сергеева. Н. Новгород: НГТУ; НИЦЭ, 2000. 198 с.
- 3. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». URL: http://base.garant.ru/58164311/#help (дата обращения: 17.02.2018).

УДК 005.5

В. А. Семёнова

кандидат экономических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ

Исследованы вопросы менеджмента производственного потенциала предприятий энергетической отрасли России.

Ключевые слова: потенциал, ресурсы, электроэнергетика.

V. A. Semenova

PhD, Econ., Associate Professor St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MANAGING THE PRODUCTION POTENTIAL OF ENERGY COMPANIES

The article examines issues of management of production potential of enterprises of power industry of Russia.

Keywords: capacity, resources, power.

В отчетах Министерства энергетики России в 2017 г. все чаще стали появляться следующие термины: «инновационный потенциал», «кадровый потенциал», «экспортный потенциал» как совокупность ресурсов предприятия, которые можно объединить в экономическую категорию «производственный потенциал». В экономической литературе зачастую отождествляются понятия экономического и производственного капитала. Эффективность деятельности компании, особенно производственной, материало- и капиталоемкой зависит от грамотного управления факторами потенциала.

Для предприятий непроизводственной сферы факторы деятельности аккумулируются в экономический потенциал, для оценки которого необходимо учитывать расхождения в понимании его уровней: достигнутого и перспективного. Под достигнутым потенциалом понимают стоимость основных фондов предприятия при действующих организационной структуре и производительных силах, определяющих потенциальные возможности предприятия. Перспективный определяет возможный максимальный объем производства и уровень развития предприятия при наилучшем использовании всех имеющихся ресурсов субъекта.

Несмотря на то, что потенциал в определениях базируется на экономической категории «ресурсы», это разные понятия, которые требуют уточнения.

Термин «потенциал» применяется с разными характеристиками: природный, производственный, ресурсный, экономический и т. д.

В Большой советской энциклопедии «потенциал», независимо от его видов, — это стоимость средств, запасов, источников, имеющихся в наличии, которые могут быть мобилизованы, приведены в действие, использованы для достижения цели. Потенциал также — это «возможности» или «способность», обусловленные совокупностью средств предприятия [2].

С. И. Ожегов потенциал определяет как величину, характеризующую широкий класс силовых полей в данной точке [5].

Таким образом, авторы понимают под потенциалом ресурсы, работающие в заданном направлении, что более точно сформулировано у Т. Г. Храмцовой [9].

И.Т. Балабанов ресурсы, как основу потенциала, делит на технические, технологические, трудовые, пространственные (территория, помещения, коммуникации), финансовые ресурсы и возможности [1].

Несмотря на то, что ресурсы и потенциал разные, но в тоже время смежные экономические категории, В. А. Свободин связывает их в понятие ресурсный потенциал, как «совокупность имеющихся в распоряжении предприятия ресурсов (земельные, трудовые, материальные)» [8], М. А. Комаров – как «возможность, мощность...» [7].

К. М. Миско ресурсный потенциал обозначает как возможность использования ресурсов [4]. Миско говорит о том, что хозяйствующий субъект должен стремиться не наращивать ресурсный потенциал, а эффективно управлять имеющимся. Производственный потенциал — состав-



Рис. 1. Формирование потенциала предприятия

ная часть интегрального потенциала предприятия, но в большей степени он характеризует производственные способности организации.

В производственном менеджменте особое место занимает понятие *«производственный по- тенциал»* как свойство предприятия выдавать необходимую продукцию для обеспечения рыночных потребностей.

- П. И. Разиньков считает составными частями производственного потенциала основные производственные фонды, технологию, энергию и информацию, промышленно-производственный персонал. [6].
- С. В. Люцук и А. А. Кутин производственный потенциал видят в энергетических и материальных ресурсах, основных производственных фондах, информационных ресурсах, кадровых и организационных ресурсов [3].

По определениям производственного потенциала в литературе наиболее значимыми при оценке производственного потенциала являются 5 следующих составляющих:

- производственная составляющая основные производственные фонды предприятия;
- материальная составляющая оборотные средства предприятия, материальные ресурсы;

- кадровая составляющая персонал;
- технико-технологическая составляющая техническая база предприятия и применяемые технологии;
- информационная составляющая особые знания, информационные технологии и ресурсы.

Схему формирования экономического потенциала можно представить в виде рис. 1.

После прекращения деятельности РАО «ЕЭС России» в 2008 г. производственный потенциал энергетической отрасли России распределен по предприятиям в рамках стратегии демонополизации:

После прекращения деятельности РАО «ЕЭС России» в 2008 г. производственный потенциал энергетической отрасли России распределен по предприятиям в рамках стратегии демонополизации по следующим группам компаний:

- 1. Основные генерирующие энергетические компании России:
 - АО «Концерн Росэнергоатом»;
 - ПАО «РусГидро»;
 - ООО «Газпромэнергохолдинг»;
- ПАО «Юнипро» (до июня 2016 г. ОАО «Э.ОН Россия»);



Рис. 2. Производственный потенциал предприятия

- Энел Россия:
- ОАО «Фортум»;
- ПАО «Квадра»;
- $-\Pi AO O \Gamma K-2$.
- 2. Инфраструктурные компании и организации:
 - OAO «CO EЭС»;
 - Ассоциация «НП Совет рынка»;
 - ПАО «Интер РАО ЕЭС».
 - 3. Электросетевые компании:
 - ПАО «Россети»;
 - ОАО «ФСК ЕЭС».

Характеристики данных компаний и цели их деятельности описаны на сайте министерства энергетики России [11].

Управление производственным и экономическим потенциалом энергетических компаний России, по данным Министерства энергетики России, на сегодняшний день в большей степени ориентируется на достижение основной целевой функции — максимизации объемов производимой электроэнергии за счет применения атомной энергетики. Однако комплексный анализ состояния отрасли и прогноз ее развития, а также организаций в ее составе, целесообразно оценивать на основе расчета количественных показателей факторов производственного потенциала (см. рис. 2).

Экологические требования и научные подходы вынуждают предприятия электроэнергетики активнее внедрять методы оценки и анализа составных частей производственного потенциала, позволяющие повышать эффективность и безопасность хозяйственной деятельности субъектов энергетической отрасли России.

- 1. *Балабанов И. Т.* Основы финансового менеджмента: 3-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2001. 526 с.
- 2. Большая советская энциклопедия. Т. 20. М., 1977. $428 \,\mathrm{c}$.
- 3. Кутин А. А., Луцюк С. В. Анализ структуры временных связей машиностроительного производства // Технология машиностроения. 2010. №3. С. 58-61.
- 4. *Миско К. М.* Ресурсный потенциал региона (теоретические и методологические аспекты исследования). М.: Наука, 1991. 94 с.
- 5. *Ожегов С. И.* Словарь русского языка. 25-е изд. М.: АЗЪ, 2001. 763 с.
- 6. *Разиньков П. И*. Производственный потенциал предприятия. Формирование и использование. Тверь: ТГТУ, 2005. 131 с.
- 7. Ресурсный потенциал экономического роста / под ред. М. А. Комарова, А. Н. Романова. М.: Путь России, 2002. 567 с.
- 8. Свободин В. А. Вопросы определения и эффективности производственного потенциала // АПК: экономика, управление. 1991. № 3. С. 27—30.
- 9. *Храмцова Т. Г.* Методология исследования социально-экономического потенциала потребительской кооперации. Новосибирск: СибУПК. 2002. 374 с.
- 10. URL: http://be5.biz/ekonomika1/r2012/1328.htm (дата обращения: 13.03.2018).
- 11. URL: https://minenergo.gov.ru/node/1161 (дата обращения: 13.03.2018).

УДК 541.124:542.952.6:547.313

Е. А. Киселева*

кандидат технических наук

А. А. Василенко*

Лаборант

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

ГАЗОДИФФУЗИОННЫЕ СЛОИ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Показан газодиффузионный слой из функциональных углеродных материалов для водородо-воздушных топливных элементов, используемых в энергетических установках. Нами предложен газодиффузионный слой, в котором на слое основного материала предусматривается слой проводящих микрочастиц посредством регулирования распределения размеров пор и капиллярной силы пор в слое проводящих микрочастиц и капиллярной силы в слое основного материала.

Ключевые слова: газодиффузионные слои, функциональные углеродные материалы, топливные элементы

E. A. Kiseleva

PhD, Tech.

A. A. Vasilenko

Laboratory assistant

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (OIVT RAS)

GAZODIFFUSION LAYERS FROM FUNCTIONAL CARBON MATERIALS FOR FUEL ELEMENTS USED IN ENERGY INSTALLATIONS

A gas-diffusion layer of functional carbon materials for hydrogen-air fuel cells used in power plants is obtained in this paper. We have proposed a gas diffusion layer in which a layer of conductive microparticles is provided on the layer of the base material, depending on the form in which they are located.

Keywords: gas-diffusion layers, functional carbon materials, fuel cells

Использование электричества как наиболее удобного, эффективного и широко применяемого в различных секторах экономики и в быту энергоносителя в отличие от других промежуточных энергоносителей, энергия которых запасается в химической или других формах, требует в каждый момент времени строгого равенства подведенной к потребителю и потребляемой им электрической мощности. В настоящее время исследования в области новых материалов и технологий для источников и накопителей электрической энергии ведутся достаточно интенсивно во всем мире. Это связано с надеждами на решение целого ряда проблем энергетики, экологии, транспорта и некоторых отраслей промышленности путем применения дешевых и безопасных источников и накопителей электрической энергии с большим сроком службы. Роль разработки новых материалов, технологий формирования активных слоев и электродов, электролитов и других компонентов является определяющей в достижении целевых показателей по ценам, сроку службы, удельным характеристикам источников энергии.

В настоящее время топливные элементы (ТЭ) и батареи широко используются для выработки электроэнергии на транспорте, в коммунальном хозяйстве, в переносных электронных устройствах и других приложениях. К наиболее распространенным типам топливных элементов относятся фосфорно-кислотные, с полимерными протонообменными мембранами, щелочные, метанольные прямого преобразования, регеративные, цинко-воздушные, твердооксидные и т. д.

Одним из необходимых компонентов ТЭ является элемент конструкции в виде листового материала с высокой пористостью, хорошо пропускающий газы, участвующие в электрохими-

ческих реакциях, обладающий высокой электропроводностью. По сложившейся терминологии такой элемент называют газодиффузионный слой (ГДС).

ГДС является важным компонентом ТЭ и выполняют следующие функции: доставляют газы и жидкие реагенты (топливо и окислитель) к нужным электродам и распределяют реагенты необходимым и контролируемым образом; обеспечивают механическую поддержку мембран и электрокаталитических слоев катализатора; подводят и отводят электроны к/от электродов; помогают отводить тепло; обеспечивают передачу нагрузок уплотнителей сборки батареи ТЭ; участвуют в сопряжении внутренних частей батареи ТЭ.

Неудивительно, что ведущие мировые производители систем с ТЭ уделяют пристальное внимание как техническим и эксплутационным характеристикам ГДС, так и их стоимости. Наиболее значимыми для рынка компонентами батареи топливных элементов являются биполярные пластины и мембранно-электродные блоки (МЭБ). МЭБ представляет собой конструкцию, состоящую из покрытой катализатором мембраны, находящейся между двумя слоями ГДС, которые спекают горячим прессованием. ГДС и каталитические чернила являются наиболее дорогими субкомпонентами МЭБ в составе батареи ТЭ. На создание более дешевых и доступных ГДС из функциональных углеродных материалов и направлена наша работа.

Предложенный ГДС имеет двухслойную конструкцию, в которой проводящий микропористый слой нанесен поверх макропористой углеродной основы. Подслой основного материала состоит из гидрофобизированного макропористого активированного угля и ацетиленовой сажи. Микропористый подслой более тонкий и в свою очередь состоит из микропористого активированного угля с наноуглеродными добавками (нанотрубки, сажи и т. п.).

Определяющую роль в эффективности работы электрода (ГДС с нанесенным катализатором на его поверхность) играют его пористая структура и свойства функционального углеродного материала, из которого он изготовлен. Для получения максимальных удельных электрохимических характеристик МЭБ, для каждого подслоя ГДС подбирается определенный тип углеродного материала, так, для основного слоя - макропористый углерод, с более широкими порами, а для верхнего, активного слоя - микропористый уголь с развитой поверхностью. Наиболее подходящим материалом является активированный уголь (АУ). Он обладает относительно низкой стоимостью, широко доступен, стабилен во многих средах, имеет высокую проводимость [1].

Основная площадь поверхности пористого угля заключается в микропорах. Однако необходимо подбирать оптимальную пористую струк-

туру угля, добиваясь максимальных удельных электрохимических характеристик МЭБ и минимального внутреннего сопротивления.

Помимо влияния распределения пор по размеру у активированных углей, важным фактором является пористая структура самого слоя, а именно его способ формирования.

В нашем случае предлагается способ холодного каландрирования (раскатки), в сравнении с общепринятым напылением. Внутреннее сопротивление у электродов сформированных методом напыления выше, чем при использовании электродов, изготовленных методом каландрирования. Скорее всего, это связано с особенностями формирования структуры электродов при различных способах их изготовления. Напыленные электроды имеют более рыхлую структуру [2]. Их плотности ниже, чем у электродов, изготовленных методом каландрирования. Вследствие этого контакт частиц угля друг с другом и, главным образом, с токопроводящей подложкой в случае напыленных электродов намного хуже, чем в случае раскатанных. Тем не менее, тонкие напыленные электроды показывают наилучшие характеристики даже при больших токах.

Метод каландрирования электродов более технологичен по сравнению с методом напыления. Он позволяет изготавливать электроды в широком диапазоне толщин. Сопротивление раскатанных электродов значительно ниже, чем у напыленных.

Методика эксперимента

Для изготовления ГДС использовались функциональные углеродные материалы: активированный уголь собственного производства из растительного сырья и одностенные нанотрубки Tuball. При замесе смеси угля и фторопласта, а также при изготовлении электродов температура смеси всегда была выше 19°C. Это важно с точки зрения фибриллизации частиц фторопласта. Фторопласт Ф-4 имеет 2 фазовых перехода: при 19° С и 30° С [3]. При температуре ниже 19° С образование волокон (т. е. «разматывание» частичек фторопласта) практически не происходит. При температурах выше 19°C и 30°C происходит все большая фибриллизация фторопласта. При замешивании сметанообразной смеси угля и суспензии фторопласта она проявляется в сцеплении всей смеси в один комок (замешивание при низких температурах не приводит к образованию комка). Однако такая смесь еще не имеет прочности (наподобие пластилина). Это связано с малым процентом «размотанных» частиц фторопласта. При каландрировании резко увеличивается количество размотанных частиц фторопласта и электрод помимо того, что становится нужной формы, также приобретает необходимую прочность. Однако доведение электрода до готового состояния имеет ряд тонкостей. Даже небольшая особенность в ходе каландрирования может повлиять на конечные характеристики электрода.

Результаты и их обсуждение

При увеличении доли связующего увеличивается плотность ГДС, что, во-первых, связано с заменой пористого угля на сплошной фторопласт, а во-вторых, с более плотной упаковкой частиц угля в электроде (рис. 1). Для раскатанных ГДС сильно увеличивается их гидрофобность при повышении доли ПТФЭ в электроде. При большой доле связующего гидрофобные образования из нитей фторопласта закрывают су-

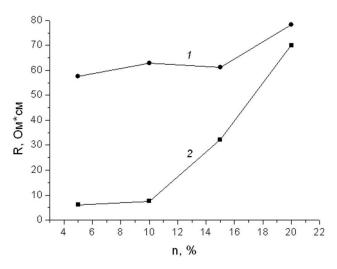


Рис. 1. Зависимость внутреннего сопротивления ячейки ТЭ от содержания фторопласта в раскатанных ГДС: 1 — толщина ГДС 200 мкм; 2 — толщина электрода 100 мкм

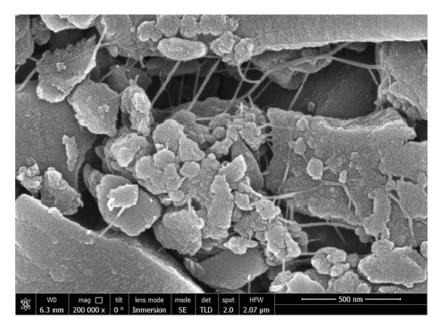
щественную часть частиц угля, перекрывая доступ электролита к микропорам.

Таким образом, выбор количества связующего на основе водной суспензии ПТФЭ, в первую очередь, может определяться требованиями к технологичности изготовления и прочности электродов и мало сказывается на электрохимических характеристиках электродов.

В зависимости от количества связующего меняются свойства электродов, такие как прочность, удельное и контактное сопротивления, гидрофобность и емкость. С точки зрения дальнейшего внедрения данных технологий в массовое производство ГДС технология каландрирования более предпочтительна, так как она легче реализуема. С ее помощью можно изготавливать электроды больших толщин, обладающих низким сопротивлением и достаточно высокими удельными электрохимическими характеристиками. Технология напыления может найти применение в формировании каталитического слоя на уже готовый ГДС.

Газодиффузионный слой – это пористый слой, который обеспечивает эффективную диффузию реагентов к каталитическому слою. Кроме того, ГДС должен обладать хорошей электропроводностью, так как является проводником, через который происходит перенос электронов к каталитическому слою и от него. Обычно ГДС делают из пористого углеродного материала толщиной 100...300 мкм. ГДС также участвует в водном менеджменте, позволяя некоторому количеству воды достигать мембраны и увлажнять ее.

Одной из важной составляющей электрода является незначительное (менее 1%) добавление углеродных нанотрубок повышающих прочность и электропроводность ГДС. На рис. 2 представлена микрофотография слоя с добавлением



 $Puc.\ 2.\ Mикрофотография\ \Gamma ДС\ c\ \partial oбавлением$ менее 1% нанотрубок $Tuball\ фирмы\ OCSiAL$

Таблица

Свойства ГДС 24/25

Свойство	Единицы	ГДС1А	гдс1Б	ГДС2А	гдс2Б
Толщина	мкм	190	235	190	235
Объемный вес	Γ/M^2	54	100	40	86
Пористость	%	84	76	88	80
Воздухопроницаемость	см ³ / (см ² ·с)	60	0, 6	210	1, 0
Электрическое сопротивление	, , , , ,				
(перпендикулярно поверхности)	$\text{mOm}\cdot\text{cm}^2$	< 10	< 12	< 10	<12

нанотрубок Tuball фирмы OCSiAL, по которой видно высоко развитую активную поверхность Γ ДС.

Газодиффузионные слои для топливных элементов являются двухмерными углеродными материалами, разработанными с целью получения меньшей толщины, большей жесткости на изгиб, более низкой остаточной деформацией и более низкой сжимаемостью по сравнению с аналогами. В таблице приведены 4 типа разработанных ГДС: ГДС1А, ГДС1Б, ГДС2А, ГДС2Б, с соответствующими характеристиками.

Нами был разработан ГДС из функциональных углеродных материалов, с добавлением нанотрубок. Была изучена корелляция между количеством фторопласта в слое и его сопротивлением. Предложены 4 варианта электродов, которые могут быть использованы в топливных элементах, используемых в энергетических энергоустановках.

- 1. Zhurilova M. A., Yanilkin I. V., Kiseleva E. A. et al., Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Khim. Khim. Tekhnol. 2017. Vol. 60. No. 4. Pp. 82–87.
- 2. Kiseleva E. A., Lelin F. V., Zhurilova M. A., Shkolnikov E. I. Ways to form electrodes for supercapacitors with aqueous and organic electrolytes and specific features of these methods. RUSS J APPL CHEM. 2017. Pp. 712–715.
- 3. Ariawan A. B., Ebnesajjad S., Hatzikiriakos S. G. Properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) paste extrudates // Polymer engineering and science. 2002. Vol. 42. No. 6. Pp. 1247–1259.

УДК 547.44:669.094.3:541.12.012

А.В. де Векки*

доктор химических наук, профессор

Ю. Т. Виграненко**

доктор химических наук, профессор

С. Б. Кочерегин**

кандидат химических наук, доцент

Т. Е. Крылова*

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения **Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова

ОКИСЛЕНИЕ 2- ПЕНТИЛ 1- НОНЕНАЛЯ В ПРИСУТСТВИИ ВОДНОГО РАСТВОРА ГИДРОКСИДА НАТРИЯ

Осуществление окисления 2-пентил 1-ноненаля кислородсодержащим газом в присутствии водного раствора гидроксида натрия позволяет получить 2-пентил1-ноненовую кислоту с приемлемым выходом. Выявлено влияние температуры, концентраций кислорода и исходного альдегида на скорость и селективность реакции.

Ключевые слова: окисление, кислородсодержащий газ, непредельный альдегид C_{14} , непредельная кислота C_{14} , непредельная надкислота C_{14} .

A.V. de Vekki*

Dr. Sc., Chem., Professor

J. T. Vigranenko**

Dr. Sc., Chem., Professor

S. B. Kocheregin **

PhD, Chem., Associate Professor

T. E. Krylova*

Senior Lecturer

- * St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
- ** St. Petersburg State Forest Technical University

OXIDATION OF THE 2-PENTYL 1-NONENAL PRESENCE OF A WATER SOLUTION OF THE SODIUM HYDROXIDE

The oxidation of the 2-pentyl-1-nonenal by oxygen contained gases in presence of water solution of sodium hydroxide allows to obtain 2-pentyl-1-nonenoic acid with an acceptable yield. The influence of temperature, oxygen concentration and initial aldehyde on the rate and selectivity of the reaction were studied.

Keywords: oxidation, the oxygen-containing gas, unsaturated aldehyde C_{14} , unsaturated acid C_{14} , unsaturated peracid C_{14} .

Ненасыщенная разветвленная 2-пентил-ноненовая кислота широко используется в качестве экстрагента для извлечения f-элементов из водных растворов их солей, в производстве автомобильных эмалей, фенолформальдегидных смол и водорастворимых красок. В качестве метода ее синтеза была выбрана реакция (1) окисления 2-пентил -1-ноненаля, который в свою очередь можно получить кротоновой конденсацией на гептаналя.

$$C_{13}H_{25}CHO+0.5O_2 \xrightarrow{cat} C_{13}H_{25}COOH$$
 (1)

Выбор обусловлен 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 [3]. Реакция окисления алифатических альдегидов описана в литературе. В качестве катализаторов используются соли меди, никеля, марганца, палладия, серебра, платины, кобальта [4,5], однако выходы кислоты недостаточно высоки и не превышают 65%. Описано также использование для окисления альдегидов солей щелочных и щелочноземельных металлов [6], а также водных растворов гидроксидов натрия [7], которые ускоряют реакцию окисления n-гексадекана.

Исследование реакции окисления предельного разветвленного альдегида С₁₄ проводили в реакторе, изготовленном из нержавеющей стали объемом 1дм³, снабженным мешалкой, электропечью, карманом для термопары, вентилем для подачи кислородсодержащего газа и отсекаемой емкостью объемом 10см³ для отбора проб жидкой фазы [8]. 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 С₁₄. 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°C. Температура испарителя 200°C, газ-носитель – аргон. Скорость подачи аргона $3.9*10^{-4}$ дм 3 /с, скорость подачи воздуха $6,5*10^{-4}$ 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 брали, как и при окислении альдегида $C_{10}[2]$.

В качестве катализаторов были использованы соли марганца, калия и водный раствор гидроксида натрия, как наиболее доступные и важные для промышленного применения. В присутствии соединений $\mathrm{Mn^{2}}_{+}$ и ацетата калия выход непредельной кислоты $\mathrm{C_{14}}$ не превышал 64% изза 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% 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 $20-40^{\circ}$ С, хотя окисление альдегида C_{14} и протекало с высокой селективностью (91–94%), конверсия изодеканаля не превышала 50%. Из побочных продуктов его окисления были идентифицированы надкислота C_{14} и продукты конденсации, образующиеся согласно уравнениям (2) и (3).

$$C_{13}H_{25}CHO + O_2 \rightarrow C_6H_{25}CO_3H(2),$$
 (2)

$$2C_{13}H_{25}CHO \rightarrow C_{27}H_{49}CHO + H_2O(3)$$
 (3)

Более обнадеживающие показатели по конверсии (82%) и селективности (85%) 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 93%. Одновременно возрастают и скорости побочных реакций (2), (3), что приводит к снижению селективности по целевому продукту с 88% до 80%. Изменение концентрации исходного альдегида C_{14} в загрузке с 25,3% до 76,6% мас. (табл. 3) практически не изменяли показатели реакции (1) по скорости и селективности, что свидетельствует о ее первом порядке по изодеканалю [9].

Таким образом:

1) реакция окисления насыщенного альдегида в присутствии водного раствора NaOH имеет первый порядок по изодеканалу в интервале его концентраций 99,1%–75,7% мас. и положительный порядок по кислороду;

2) найдены приемлемые условия синтеза предельной разветвленной кислоты C_{14} , обеспечивающих выход целевого продукта более 80%.

Таблица 1

Температура,		Состав орга	Конверсия	Селективность			
°C	Гексан	Непредельный	Надкислота	Непредельная	ВКП	альдегида	по кислоте C _{14,}
		альдегид С ₁₄	C ₁₄	кислота С ₁₄		C_{14} , %	%
20	41,3	37,7	1,2	19,7	0,2	34	94
40	41,1	32,4	2,1	24,0	0,4	43	91
60	40,7	20,5	3,2	34,3	1,3	64	88
80	40,4	10,0	4,0	42,1	3,5	82	85

Таблица 2

$[O_2]$		Состав органической фазы, % мас.					Селективность
в кислородсодер- жащем газе, про- цент об.	Гексан	Непредельный альдегид С ₁₄	Надкислота ${ m C}_{14}$	Непредельная кислота ${ m C}_{14}$	вкп	альдегида ${ m C}_{14,}\%$	по кислоте ${\rm C}_{14,}\%$
20,9	40,7	20,5	3,2	34,3	1,3	64	88
49,3	40,4	10,1	5,1	41,6	2,8	82	84
65,9	40,2	3,9	5,3	47,6	3,3	93	80

Таблица 3

[Альдегид C ₁₀],	Состав органической фазы, % мас.					Конверсия	Селективность
процент мас. в загрузке	Гексан	Непредельный		Непредельная	вкп	альдегида С _{14.} %	по кислоте ${ m C}_{14,}$
25,3	73,7	альдегид С ₁₄ 8,7	1,0	кислота С ₁₄ 15,6	1,0	65	89
57,4	40,7	20,5	3,2	34,3	1,3	64	88
75,7	21,5	24,6	4,4	48,5	1,0	67	90

В табл. 1–3 ВКП – высококипящие побочные продукты.

Влияние температуры на скорость и селективность реакции окисления 2-пентил-1-ноненаля кислородсодержащим газом в присутствии 10% водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фаз 1:1. Загрузка: 140 мл гексана, 140 мл непредельного альдегида C_{14} .

Время реакции — 90 мин, скорость подачи (органическая фаза) кислородсодержащего газа 8 дм 3 /час. [O $_2$] в кислородсодержащем газе = 20,9% об. (табл. 1).

Влияние состава кислородсодержащего газа на скорость и селективность реакции окисления 2-пентил 1-ноненаля в присутствии 10% водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фазы 1:1. Температура 60° С. Время реакции 90 мин. Загрузка: 140 мл гексана, 140 мл непредельного альдегида C_{14} (органическая фаза). Скорость подачи кислородсодержащего газа 8 дм 3 /час (табл. 2).

Влияние концентрации 2-пентил-1-ноненаля на скорость и селективность реакции его окисления кислородсодержащим газом в присутствии 10% водного раствора NaOH. Объемное соотношение органической и водной фаз 1:1. Объем загрузки жидкой фазы (органический слой) 280мл. Время реакции — 90 мин, скорость подачи (органическая фаза) кислородсодержащего газа 8 дм 3 /час. $[O_2]$ в кислородсодержащем газе = 20.9% об., температура 60° С (табл. 3).

- 1. Краткий справочник нефтехимика / под ред. В. А. Рыбакова. СПб: Химия, 1993. 464 с.
- 2. Крылова Т. Е., Виграненко Ю. Т., Кочерегин С. Б. Окисление предельного разветвленного альдегида C_{10} в двухфазной системе жидкостьжидкость / Сб. Завалишинские чтения, 2017. СПб.: ГУАП. С. 273–275.
- 3. *Ганкин В. Ю., Гуревич Г. С.* Технология оксосинтеза. Л.: Химия, 1981. 272 с.
- 4. Заявка 1201637 ЕПВ МПК 7 с7 с51/27. Заявл. 24.80.2001. опубл. 2.05.2002 г.
- 5. Debashic C., Ravikumar G., PayalMTetrahedrounLett. 2009. V. 50. No 47. Pp. 6553–6556.
- 6. Заявка 802004055252 Германия МПК 7. Заявл.16.11.2004. опубл. 24.05.2006.
- 7. Проскуряков В. А., Потехин В. М. Окисление н-пентаналя в водно-щелочной среде // Журнал прикладной химии. 1996. Т. 39. № 80. С 2389–2393 ().
- 8. Ганкин В. Ю., Рудковский В. М., Рыбаков В. А. Выбор кинетической области реакции окисления н-гексаналя в двухфазной системе жидкость- жидкость // Журнал прикладной химии. 1971. № 6. С. 1347–1351.
- 9. *Денисов Е. Т.* Химическая кинетика М.: Наука, 2000. 565 с.

УДК 544.774

Ю. С. Николаев*

кандидат химических наук, доцент

П. С. Козырь*

студентка

*Cанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ХИМИЯ ИСКУССТВЕННЫХ МЫШЦ: НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены свойства углеродных нанотрубок и графена, возможность их адаптации для взаимодействия с живыми тканями.

Ключевые слова: графен; углеродные нанотрубки; оксид графена; гидрофильность; сверхэластичность.

Yu. S. Nikolaev*

PhD, Chem., Associate Professor

P. S. Kozyr*

Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

CHEMISTRY OF ARTIFICIAL MUSCLES: NEW PERSPECTIVES BASED ON THE USE OF CARBON NANOSTRUCTURED MATERIALS

This article presents the properties of carbon nanotubes and graphene, the possibility of their adaptation for interaction with living tissues.

Keywords: graphene; carbon nanotubes; graphene oxide; hydrophilicity; superelasticity.

Искусственные мышечные волокна, способные многократно сокращаться под действием внешнего стимула и совершать механическую работу, в недалеком будущем могут найти применение в разнообразных приложениях, от экзоскелетов и промышленных роботов до микрофлюидных технологий. Разработки и исследования искусственных мышц ведутся по разным направлениям — металлы с памятью формы, электроактивные полимеры, жгуты из углеродных нанотрубок.

Графен является двухмерным материалом с гексагональной кристаллической структурой, он отличается необычными механическими и электрическими свойствами. По прочности на разрыв он превосходит сталь в 200 раз, скорость электропроводности сопоставима со скоростью света, а масса пленки графена толщиной в один атомный слой размером с футбольное поле составляет менее 1 г. Удельное электрическое сопротивление этого материала при комнатной температуре равно ~1 мкОм·см, что на 35 % меньше, чем у меди. Уникальные электронные свойства графена проявляются и в оптике. Его

теплопроводность в 10 раз больше чем у меди. В кристаллической структуре графена атомы углерода выстроены в решетку — это так называемые «пчелиные соты», слой углерода толщиной в один атом может служить «посредником», позволяющим выращивать вертикальные нанотрубки почти на любой поверхности, в том числе и на поверхности алмаза. Можно спрогнозировать, что нанотрубки несложно получить и на поверхности теплоотводов из алюминия и меди.

Нанотрубки и графен не могут быть термодинамически устойчивыми, поскольку избыточная поверхностная энергия (ΔG^S) больше 0 ($\Delta G^S > 0$).

Так, графен может существовать только лишь нанесенным на твердые подложки.

Результаты исследования, проведенного университетом *Rice* совместно с компанией *Honda*, позволят выращивать нанотрубки на подложках, которые раньше считались для этого совершенно непригодными. Ученые продемонстрировали это, вырастив нанотрубки на поверхности алмаза. Алмаз очень хорошо, в пять раз лучше меди, проводит тепло. Но площадь его поверхности, излучающей это тепло, очень мала. Графен,

наоборот, фактически состоит только из поверхности. То же можно сказать и об углеродных нанотрубках, которые представляют собой скрученный в трубки графен [1].

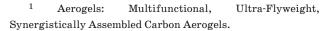
В 2013 г. учеными была опубликована статья «Аэрогели: многофункциональный, ультрамалый, синергетически собранный углеродный аэрогель»¹, в которой они описали поведение во время испытаний нового материала — аэрогеля из графена и углеродных нанотрубок [2].

Ультра-легкий аэрогель (УАГ), состоящий из графена и углеродных нанотрубок, производился непосредственно путем криодеструкции из водных растворов частичек углеродных нанотрубок (УНТ) и гигантского графена оксида (ГГО) (замороженная система может обратимо стать жидкостью при нагревании). Были интегрированы все углеродные аэрогели с требуемыми плотностями и формой, такие как стержни, цилиндры, листы и кубики. Изображения сканирующего электронного микроскопа (SEM) показывают, что УАГ представляет собой взаимосвязанный пористый трехмерный (3D) каркас случайно ориентированных извилистых листов с непрерывными макропорами от сотен нанометров до десятков микрометров, аналогичные тем, что были в ранее очищенных аэрогелях из графена. Подробные наблюдения демонстрируют многообразные взаимосвязи листов (графен в сочетании с УНТ): перекрытие, скручивание и закручивание.

Эксперименты по сжатию и эластичности на УАГ показали почти полное восстановление после сжатия на 50-82%. УАГ претерпевают поперечное сжатие при воздействии сжатием в одном направлении, что ведет к отрицательному значению коэффициента Пуассона. Это также наблюдалось в ячеистых материалах и материалах аэрогеля УНТ. Кривые зависимости напряжение (σ)-деформация (ε) демонстрируют два разных этапа во время процесса нагружения образца (рис. 1). Линейно-упругий режим при $\epsilon < 29\%$ с модулем упругости чуть более 4 кПа регистрирует упругий изгиб стенки ячейки, а нелинейный режим при $29\% < \epsilon < 50\%$ имеет увеличенный наклон с модулем 22 кПа, причем деформация все еще восстанавливается из-за упругого выпучивания клеточных стенок.

После испытания на усталость в 1000 циклов образец по-прежнему сохранял свою первоначальную толщину, макроскопическую форму и пористую трехмерную микроскопическую структуру, а взаимодействие между стенками ячейки оставалось неповрежденными.

Упругие свойства УАГ (рис. 2), такие как модуль накопления (средняя линия), модуль по-



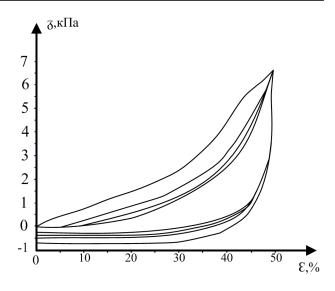


Рис. 1. График зависимости деформации от напряжения на образце

терь (нижняя линия) и коэффициент затухания (верхняя линия), измеренные динамическим термомеханическим анализатором (ДТА), практически постоянны в широком температурном диапазоне от -193 до 300° С. Фактически образцы УАГ, находящиеся при температуре 900° С в течение 5 ч в атмосфере N_2 , были все еще не повреждены и имели высокую эластичность.

Гигантские графеновые хлопья создают каркас с макропорами, делая аэрогель ультралегким; покрытие из УНТ усиливает относительно гибкую подложку графена и обеспечивает собственной эластичностью совместно образованный аэрогель. Этот синергетический эффект

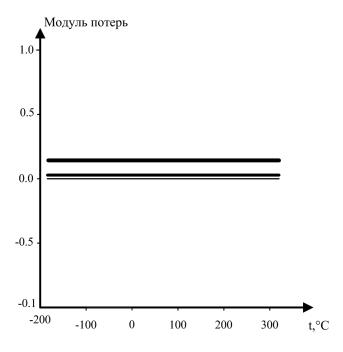


Рис. 2. График зависимости потерь УАГ от температуры

сильно зависит от ван-дер-ваальсового притяжения между графеном и УНТ. Пены из гигантского графена оксида (ГГО) покрытых УНТ демонстрируют слабую эластичность, в то время как сверхэластичность возникает сразу после обработки парами гидразина. Таким образом, химическое восстановление ГГО имеет решающее значение для достижения хорошей эластичности, так как восстановленный графен имеет более сильное π - π -взаимодействие между двумя стенками вследствие восстановления объединенной углеродной сетки. Четкое и плотное покрытие из УНТ способствует переносу нагрузки от графена к эластичным УНТ, что приводит к сверхэластичности.

Наиболее общий обзор свойств графена дан в [3].

Химическая структура оксида графена (ОГ) точно не установлена, предложено несколько моделей, одна из которых представлена на рис. 3.

В оксиде графена некоторые атомы углерода соединены с кислородосодержащими группами. При этом в отличие от графена у атомов углерода возникает четвертая ковалентная связь в результате перехода атома углерода из состояния sp²- в состояние sp³-гибридизации.

По наружным краям плоскости и по внутренним краям дефектов плоскости графена в виде разрывов располагаются карбоксильные (-СООН) и кетонные (=СО) группы, а над и под

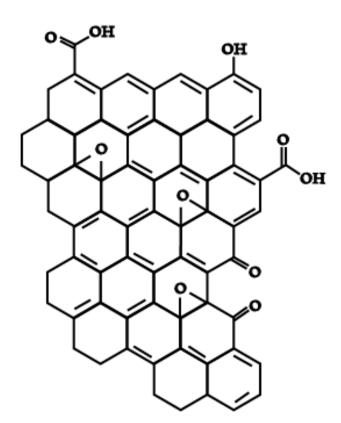


Рис. 3. Модель оксида графена

плоскостью графена – гидроксильные (-ОН) и эпоксидные (=О) группы.

Графеновая плоскость деформирована за счет перехода атомов углерода из sp²- в sp³- гибридизованное состояние. Толщина слоя оксида графена в среднем составляет 1 нм, что больше, чем у обычного графена (0,335 нм), и объясняется наличием функциональных групп. Суспензия оксида графена представляет собой взвесь нанолистов оксида графена в воде с концентрацией от 1 до 4 мг/мл. Благодаря гидрофильным свойствам оксид графена легко образует в воде устойчивые коллоидные дисперсии за счет образования водородных связей между молекулами воды и кислородсодержащими группами [4].

Сочетание графена и углеродных нанотрубок позволило получить ультралегкий аэрогель (УАГ), не имеющий недостатков аэрогелей, созданных только из графена или только из нанотрубок. Новый материал помимо обычных для аэрогелей свойств (чрезвычайно низкая плотность, твердость, низкая теплопроводность) обладает также высокой эластичностью (способностью восстанавливать форму после многократных сжатий и растяжений) и способностью абсорбировать органические жидкости. Последнее свойство можно использовать для ликвидации разливов нефти. УАГ могут применяться также в качестве эластичных и гибких проводников, высокоэффективных проводящих полимерных композитов, органических абсорбентов, материалов для восстановления окружающей среды, в энергосбережении с фазовым переходом, датчиков, суперконденсаторов и каталитических слоев [2].

Одной из самых дальновидных и глобальных идей использования углеродных наноматериалов является их применение в медицине в качестве искусственных трансплантатов для человека или же создание экзоскелета. Внутри человека существуют биоэлектрические потенциалы, наблюдаемые в живых клетках организма в состоянии покоя или при физиологической деятельности. Между наружной поверхностью клеточной мембраны и внутренним содержимым клетки всегда существует разность потенциалов, возникающая из-за различной концентрации ионов K+, Na+, Cl⁻ внутри и вне клетки и различной проницаемости клеточной мембраны. Эта разность потенциалов, называемая еще «током покоя» составляет в среднем 60-90 мВ. Когда клетка возбуждена, за счет изменения проницаемости мембраны и увеличения скорости перемещения ионов, «ток покоя» изменяется.

В клетках возбудимых тканей (мышечной, нервной) этот процесс изменения происходит за миллисекунды. Разность такого биоэлектрического потенциала может достигать 120 мВ [5].

Потенциалы активации мышц в живых организмах не совпадают с необходимым для работы новых мускул напряжением. Напряжение, необходимое для активации однослойных углеродных нанотрубок, равно 1–3В. Разности потенциалов клеток человеческого организма будет не хватать, чтобы привести в действие нанотрубки материала. В этом случае в организм может быть вживлен дополнительный источник энергии типа кардиостимулятор. Вопрос трансплантации мышц в живой организм остается открытым и требует дальнейших исследований.

Важная задача — соединить графен с живым организмом. В этом отношении нам представляется перспективным вести разработки в области гидрофилизации новых углеродных наноматериалов.

- 1. *Меркульев А. Ю., Юрков Н. К.* Графен как материал для теплоотводов нового поколения // Молодой ученый. 2014. №3. С. 331–333.
- 2. Haiyan Sun, Zhen Xu, Chao Gao. Aerogels: Multifunctional, Ultra-Flyweight, Synergistically Assembled Carbon Aerogels // Advanced Materials. 2013. V.25. P. 2554–2560.
- 3. Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Красиков Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук 2011. С. 233–268.
- 4. Федорова Г. Д., Александров Г. Н. Смагулова С. А. Исследование устойчивости водной суспензии оксида графена // Строительные материалы. 2015. №2. С. 15–21.
- 5. Биоэлектрические потенциалы // Медицинская энциклопедия. URL: http://medical-enc.ru/2/biotoki.shtml (дата обращения: 15.02.2018).

УДК 661.183.2

Т. И. Фомичева

кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ УГЛЕЙ

Приведены данные об использовании технического лигносульфоната в получении активных углей.

Ключевые слова: активные угли, отходы целлюлозно-бумажного производства, сорбция.

T. I. Fomicheva

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

USE OF PULP AND PAPER WASTE TO PRODUCE ACTIVE COALS

The article presents the data of technical lignosulphonate use to produce active coals **Keywords:** active coals, pulp and paper waste, sorbcion.

Активные угли известны как сорбенты, обладающие развитой внутренней поверхностью микропор, способные поглощать органические и неорганические вещества из различных сред, как газовых, так и жидких.

Пористая структура активных углей формируется различным образом в зависимости от природы сырья, из которого получают активные угли, а также от природы используемых добавок [1, 2].

Одними из многотоннажных отходов целлюлозно-бумажной промышленности являются технические лигносульфонаты.

В процессе переработки щелоков образуется концентрат — технический лигносульфанат, который является ценным углесодержащим сырьем. Авторами патента [3] установлено, что активные угли, полученные из технических лигносульфатов, обладают высокими сорбционными свойствами по отношению к газам, парам и сорбции примесей органических и неорганических соединений из водных растворов. Поиск возможностей производства активного угля из различных углесодержащих материалов является актуальной проблемой.

Технические лигносульфонаты добавляли в шихту из торфа Сургутского месторождения. Для оценки их влияния на пористую структуру и качество получаемого активного угля использовали следующие массовые соотношения торфяной пыли и технических лигносульфонатов: 1:1, 2:1, 3:1

Торф Сургутского месторождения имеет следующий состав: в пересчете на горючую массу торфа: C-57,1,H-5,67,N-1,73,S-0,15 (в масс. %).

Технические лигносульфонаты являются ценным углеродсодержащим сырьем, образующимся в целлюлозно-бумажной промышленности. Нами использовался технический лигносульфонат с ЗАО «Выборгский ЦБК» марки ЛСТ-NФ ТУ13-0281036-15-90.

Пористую структуру образцов изучали методом порометрии с использованием поромеров низкого и высокого давления для определения суммарного объема пор. Синтезированные образцы активного угля были получены по классической технологии: смешение компонентов шихты, получение пластичной массы при определенной влажности, формирование гранул, карбонизация гранул и парогазовая активация. В табл. 1 представлены результаты влияния добавок лигносульфоната на формирование пористой структуры образцов активного угля.

Использование лигносульфоната при изготовлении шихты из торфа увеличивает суммарный объем микропор до 1, $25~{\rm cm}^3$ /г.

Оценку эффективности применения проводили путем изучения фиксации низких концентраций органических веществ активными углями, полученными его из торфа и технических лигносульфонатов.

Сорбционную активность проверяли по стандартному методу сорбции паров бензола наве-

Таблица 1 Сорбционные характеристики образцов активного угля

Измеряемый параметр	Соотношение торф — техниче- ский лигносульфонат				
	1:1	2:1	3:1	Без лигно- сульфоната	
W — влажность пластичной массы	55	54	56	56	
t_k — температура карбонизации	550	560	550	550	
$oxed{t_a}$ — температура активации	750	750	750	750	
τ – продолжитель- ность активации	30	30	30	30	
V_{ε} — суммарный объем пор	1,25	0,90	0,70	0,62	
$A_{f 6}$ — активность по бензолу	0,52	0,47	0,35	0,25	
$A_{ au}$ — активность по йоду	85,3	76,5	70,4	55,7	

сками угля, помещенными в эксикатор с бензолом, и сорбции из водного раствора [4].

Подготовка торфа заключалась в высушивании его до влажности 20%, измельчении в шаровой мельнице до размеров частиц 0.25-1.00 мм.

В результате исследований было выбрано соотношение торфа к лигносульфонату 2–2,2, влажность 50–55 %, период перемешивания массы 2–2,5 ч. Полученные на лабораторном грануляторе гранулы имели диаметр 1,6 мм, средняя длина – 3 мм. Гранулы карбонизировали при температуре 773–823 К до прекращения выделения паров и газов. В дальнейшем гранулы обрабатывали 10% раствором соляной кислоты с последующей промывкой водой.

Высушенные гранулы угля исследовали на сорбцию паров органических растворителей эксикаторным методом, на окислительную сорбцию диоксида серы из парогазовоздушного по-

 Таблица 2

 Сорбционная емкость активного угля в различных процессах

Процесс	Равновесная величина сорбции, процент масс.	Условия сорбции
Сорбция паров бензола	45	Θ ксикаторный метод при $\mid \mathbf{P}/\mathbf{P}_{\Sigma}\!\!=\!\!1,$ $\mathrm{T}\text{-}293\mathrm{K}$
Окислительная сорбция диоксида серы из парогазовоздушной смеси	35	Концентрации в процентах об.: ${ m SO}_2$ - 0,40; ${ m H}_2{ m O}$ - 9; ${ m O}_2$ - 20; ${ m T}$ - 293К
Сорбция фенола из водного раствора	10	Концентрация фенола в воде: $1\cdot 10^{-6} { m кг/дm}^3$

тока и на сорбцию фенола низкой концентрации из водных растворов. Результаты исследований занесены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что полученные равновесные величины сорбции активным углем достаточно велики.

Активный уголь из торфа с техническим лигносульфонатом может быть рекомендован к использованию в процессах рекуперации паров, очистки парогазовых выбросов и сточных вод.

Таким образом, характеристики полученных активных углей позволяют использовать их для очистки от примесей газовых и жидкостных сред. Качественный сорбент может быть получен из относительно недорогого сырья.

- 1. *Беляев Е. Ю.* Получение и применение древесных активированных углей в экологических целях // Химия растительного сырья. 2000. №2. С. 5–15.
- 2. Чесноков Н. В. Углеродные адсорбенты из гидролизного лигнина для очистки сточных вод от органических примесей / А. О. Еремина, В. В. Головина, Н. В. Чесноков, Б. Н. Кузнецов // Journal of Siberian Federal University; Chemistry. 2011. № 1(4) С. 100–107.
- 3. Патент РФ № 2097126. 1997. Способ получения гранулированного сорбента-катализатора / Г. Н. Бузанова, А. Ф. Туболкин, Н. В. Каракозов, В. Б. Сороко, В. Н. Гаенко.

УДК 378.147

Б. К. Елтышев*

доцент

И. В. Елтышева**

старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

О ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены подходы к построению имитационной модели системы защиты информации в автоматизированных системах с учетом современных тенденций анализа уязвимостей. Проблема рассмотрена в приложении к изучению дисциплины «Системы массового обслуживания для бакалавров направления 10.03.01 «Информационная безопасность».

Ключевые слова: системы защиты информации, оценки уязвимости, функции защиты информации, имитационное моделирование.

B. C. Eltyishev*

Associate Professor

I. V. Eltyisheva**

Senior lecturer

- * St. Petersburg State Marine Technical of University
- ** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ABOUT STATEMENT OF THE PROBLEM OF SIMULATION MODELING OF FUNCTIONING OF SYSTEMS OF INFORMATION SECURITY

The article describes the approaches to the construction of a simulation model of information security systems in automated systems, taking into account current trends in vulnerability analysis. The problem is considered in the Appendix to the study of the discipline "Queuing Systems" for bachelor's direction 10.03.01 "Information security".

Keywords: information security systems, vulnerability assessments, information security functions, simulation

При подготовке новой рабочей программы дисциплины «Системы массового обслуживания» для студентов, обучающихся по направлению 10.03.01 «Информационная безопасность» возник вопрос выбора тематики и содержания лабораторных работ. Представляется логичным формирование серии заданий по исследованию фрагментов систем защиты информации (СЗИ) в информационных (ИС) или автоматизированных (АС) системах с использованием аппарата статистического имитационного моделирования. К середине третьего курса студенты уже обладают как достаточными теоретическими знаниями основ теории массового обслуживания, так и устойчивыми практическими навыками построения и исследования соответствующих моделей в среде одного из программных симуляторов.

Целью моделирования СЗИ является определение основных свойств систем, установление связей между их характеристиками и показателями, оценка сравнительной эффективности различных механизмов защиты и способов их реализации, оптимизация решений по управлению системами. Оно должно охватывать все этапы жизненного цикла СЗИ. Все это позволяет реализовать системный подход к решению проблемы обеспечения информационной безопасности, однако требует комплексного использования методов моделирования систем и методов теории защиты информации [1], [10].

К сожалению, между этими двумя направлениями существует значительный разрыв, обусловленный разной степенью зрелости развития теорий, технологий и объема накопленных

знаний. С одной стороны, имеется многолетний опыт моделирования и проектирования на этой основе сложных организационно-технических систем. С другой стороны, присутствуют очень высокоуровневые теоретико-множественные модели безопасности, которые практически нереализуемы в силу невозможности сбора огромных объемов достоверных данных, а также множество вербальных описаний компонентов, требований и рекомендаций в этой сфере. Такая ситуация связана, в первую очередь, с крайне высоким уровнем сложности проблемы защиты, включающей сложность не только собственно системы защиты, но и самой защищаемой системы и внешней среды.

Все это превращает тривиальную, на первый взгляд, задачу подготовки нескольких лабораторных работ в проблему разработки (хотя бы упрощенной в учебных целях) методологии моделирования СЗИ.

Рассмотрим некоторые аспекты этой проблемы.

- 1. Выбор типа модели. В [1] отмечаются преимущества стохастической модели СЗИ перед аналитической, поскольку для определения показателей безопасности информации достаточно знать вероятностные характеристики угроз и эффективности механизмов защиты. Эти данные могут быть получены либо путем сбора статистики на действующих СЗИ, либо на основе имитационного моделирования.
- В нашем случае возможен только второй путь.
- 2. В качестве методической основы для формирования структуры модели угроз безопасности информации целесообразно выбрать опубликованный для обсуждения в сети Интернет документ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России: «Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах (Проект, 2015)», содержание которого соответствует современным представлениям о моделировании систем защиты [2]. Документ содержит также рекомендации по формированию структуры модели нарушителя, которая также может быть успешно использована при компьютерном имитационном моделировании СЗИ.

К сожалению, этот документ предусматривает только экспертную (ручную) оценку угроз безопасности, что снижает возможность его применения в САПР систем защиты.

3. В качестве исходных данных для имитационной модели потока угроз могут быть использованы аналитические обзоры от российских и зарубежных разработчиков программных продуктов и решений для обеспечения информационной безопасности организаций, противодействия внешним и внутренним угрозам, таких как Группа компаний *InfoWatc*η, Информацион-

но-аналитический центр Anti-Malware.ru, а также блоги специалистов по ИБ [3], [4], [5].

- 4. Учет взаимного влияния угроз и средств защиты, принципиальный при реальном проектировании СЗИ, в учебной задаче в первом приближении может быть опущен.
- 5. Поэтому в качестве теоретической предпосылки формирования модели потока угроз принимается гипотеза о стационарном пуассоновском характере потока, при котором, как известно, интервалы прибытия подчиняются экспоненциальному распределению

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \ t \ge 0, \tag{1}$$

где интенсивность λ определяется либо усреднением данных, полученных в п. 3, либо (при наличии эмпирических данных из каких-либо других источников) статистической обработкой этих данных. Реализация случайного потока с заданными параметрами формируется средствами симулятора автоматически с помощью встроенных генераторов случайных чисел и библиотечных процедур формирования соответствующих распределений.

- 6. Аналогичным образом можно оценить по эмпирическим данным математическое ожидание случайной величины ущерба от реализации угроз, приняв (по рекомендации [6]) нормальный закон ее распределения. Реализация случайной величины ущерба также обеспечивается средствами симулятора автоматически.
- 7. Несколько замечаний по упоминавшейся выше проблеме сложности СЗИ.

Известны два общих метода борьбы со сложностью при проектировании систем: иерархическая декомпозиция и обеспечение независимости компонент.

Как отмечает Т. И. Алиев, «попытка построить единую универсальную модель реальной системы, несомненно, обречена на неудачу ввиду ее необозримости и невозможности расчета. Поэтому проектирование реальных систем целесообразно проводить на основе принципа иерархического многоуровневого моделирования, базирующегося на иерархическом описании исследуемой системы и протекающих в ней процессов» [6].

Яркой иллюстрацией огромного разнообразия особенностей, которые должны быть учтены при моделировании СЗИ, может служить банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК, содержащий описания известных на сегодня 207 угроз и 18244 уязвимостей [7].

Поэтому единственно возможным способом моделирования СЗИ является их декомпозиция на совокупность иерархически соподчиненных семейств моделей, которые описывают систему на разных уровнях абстрагирования. Очевидно, такая декомпозиция может осуществляться множеством различных способов, и возникает новая проблема выбора способа декомпозиции.

8. Поскольку эта проблема уже давно ощущалась практиками IT-индустрии, в результате их совместных усилий была создана Общая система оценки уязвимостей (Common Vulnerability Scoring System CVSS) открытая схема, которая позволяет обмениваться унифицированной информацией об IT-уязвимостях и таким образом предлагает путь к ее решению. Подробная информация о CVSS и ее новой версии может быть получена на информационном ресурсе группы FIRST: URL: https://www.first.org/cvss/v2/guide [8].

CVSS не является ни системой оценки угроз, ни базой данных уязвимостей, но структура вводимых ею базовой, временной и контекстной метрик могут служить основой для системы классификационных групп на верхнем уровне системы моделирования СЗИ. Более того, полученные с помощью CVSS числовые оценки значений метрик позволяют оценить риск, который возникает от наличия уязвимости в конкретной среде.

Характерно, что такой подход ни в коей степени не противоречит, а наоборот, развивает и дополняет подход, упомянутый выше в проекте методики определения угроз безопасности информации в информационных системах ФСТЭК [2].

Для иллюстрации приведем состав и оценки компонент базового вектора $CVS\Sigma$ (табл. 1).

Все сказанное выше создает основу для формирования с помощью какой-либо моделирующей системы (симулятора) модели случайного потока атак на СЗИ, классификация параметров которого совпадает с описаниями метрик $CVS\Sigma$, а статистические характеристики определяются эмпирическими данными или техническим заданием на проектирование системы.

Перейдем теперь к концепции моделирования собственно СЗИ защищаемого объекта. Рассматривается самый общий подход, соответствующий верхнему уровню иерархии декомпозиции.

По общепринятым представлениям, по аналогии с требованиями к надежности технических систем, требования к защите формулируются в виде условия.

$$P_3 > \overline{P_3},$$
 (2)

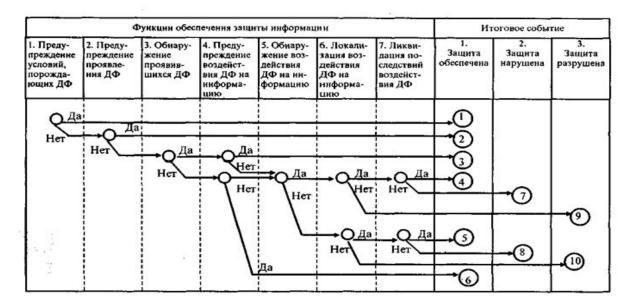
где $\overline{P_3}$ требуемый уровень защищенности, а P_3 – вероятность защищенности информации.

В основополагающей работе В. А. Герасименко и А.А Малюка приведена структура и содержание полного множества функций защиты, надлежащей реализацией которого можно обеспечить требуемую защиту в любых автомати-

Таблица 1

CVSS Base Metrics

Access Vector	Description The access vector (AV) shows how a vulnerability may be exploited	Score
Local (L)	The attacker must either have physical access to the vulnerable system (e.g. firewire attacks) or a local account (e.g. a privilege escalation attack)	0.395
Adjacent Network (A)	The attacker must have access to the broadcast or collision domain of the vulnerable system (e.g. ARP spoofing, bluetooth attacks)	0.646
Network (N)	The vulnerable interface is working at layer 3 or above of the OSI Network stack. These types of vulnerabilities are often described as remotely exploitable (e.g. a remote buffer overflow in a network service)	1.0
Attack Complexity	Description The attack complexity (AC) metric describes how easy or difficult it is to exploit the discovered vulnerability	Score
High (H)	Specialised conditions exist, such as a race condition with a narrow window, or a requirement for social engineering methods that would be readily noticed by knowledgeable people	0.35
Medium (M)	There are some additional requirements for the attack, such as a limit on the origin of the attack, or a requirement for the vulnerable system to be running with an uncommon, non-default configuration	0.61
Low (L)	There are no special conditions for exploiting the vulnerability, such as when the system is available to large numbers of users, or the vulnerable configuration is ubiquitous	0.71
Authentication	Description The authentication (Au) metric describes the number of times that an attacker must authenticate to a target to exploit it.	Score
Multiple (M)	Exploitation of the vulnerability requires that the attacker authenticate two or more times, even if the same credentials are used each time.	0.45
Single (S)	The attacker must authenticate once in order to exploit the vulnerability	0.56
None (N)	There is no requirement for the attacker to authenticate	0.704



зированных системах обработки данных (АСОД) в любых условиях, при этом модель возможных исходов имеет вид (ДФ – дестабилизирующий фактор), табл. 2 [10].

Каждый из исходов является случайным событием, и они вместе образуют полную группу несовместных событий. Если обозначить $P_r^{(\Phi)}$ вероятность успешного выполнения r-й функции, то

$$P_3 = \sum_{m=1}^{6} P_r^{(\Phi)}$$
.

Таким образом, выполнение условия (2) и оценка частоты отказов СЗИ сводится к выбору набора значений $P_r^{(\Phi)}$.

Реализация этих значений — вопрос микропроектирования СЗИ, в процессе которого наборы $P_r^{(\Phi)}$. могут итерационно уточняться.

С учетом сказанного предлагается следующая общая схема имитационной модели СЗИ (рисунок).

Построение и анализ фрагментов этой модели — темы лабораторных работ и курсовых проектов студентов направления 10.03.01 «Информационная безопасность» по дисциплине «Системы массового обслуживания».

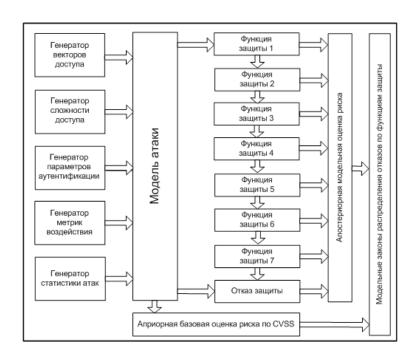


Рисунок. Общая схема имитационной модели СЗИ

Библиографический список

- 1. Сёмкин С. Н., Беляков Э. В., Гребенев С. В., Козачок В. И. Основы организационного обеспечения информационной безопасности объектов информатизации. М.: Гелиос АРВ, 2005. 192 с.
- 2. ФСТЭК России (Федеральная служба по техническому и экспортному контролю). Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах, 2015 г. (Проект).
- 3. Безопасность информации в корпоративных информационных системах. Аналитический центр InfoWatch. URL: www.infowatch.ru/analytics (дата обращения: 14.03.2018).
- 4. Информационно-аналитический центр Anti-Malware.ru. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics (дата обращения: 14.03.2018).

- 5. Информационная безопасность. Персональный блог Ивана Пискунова о безопасности, ИТ-менеджменте и управлении проектами. URL: https://ipiskunov.blogspot.ru/2017/12/2017. htm (дата обращения: 14.03.2018).
- $6.\,A$ лиев Т. И. Основы проектирования систем. СПб: ИТМО, 2015. 120 с.
- 7. Федеральная служба по техническому и экспортному контролю. Банк данных угроз безопасности информации. URL: https://bdu.fstec.ru/threat (дата обращения: 14.03.2018).
- 8. Полное руководство по общему стандарту оценки уязвимостей версии 2. Ч. 1. 2008. URL: https://www.securitylab.ru/analytics/355336.php (дата обращения: 14.03.2018).
- 9. *Григорьев В.А., Карпов А. В.* Имитационная модель системы защиты информации // Программные продукты и системы. 2005. № 2.
- 10. Герасименко В. А., Малюк А. А. Основы защиты информации. М.: МГИФИ, 1997. 537 с.

УДК 004.89; 004.942

В. А. Мыльников*

кандидат технических наук, доцент

Т. Н. Елина*

кандидат экономических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ ПРИЧИН НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ НАДЕЖНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ

Предлагается подход к обоснованию параметров производительности облачных вычислений с учетом характеристик надежности ее элементов и обеспечения требуемых характеристик устойчивости функционирования. Представлены результаты оценки производительности облачной системы для различных ситуаций с учетом модели организации облачных вычислений.

Ключевые слова: облачные вычисления, виртуализация, критерии оценки.

V. A. Mylnikov*

PhD, Tech., Associate Professor

T. N. Yelina*

PhD, Econ., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ANALYSIS OF THE REASONS OF THE VIOLATION OF THE STABILITY OF CLOUD SYSTEMS WITH THE ASSUMPTION OF RELIABILITY AND OPERATIVE REQUIREMENTS

An approach is proposed to justify the performance parameters of cloud computing taking into account the reliability characteristics of its elements and providing the required characteristics of the stability of the operation. Presented are the results of evaluating the performance of the cloud system for different situations, taking into account the cloud computing model.

Keywords: cloud computing, virtualization, evaluation criteria.

В настоящее время облачные вычисления предлагают разнообразные информационные услуги, преимуществом которых является масштабируемость, удобство сопровождения, высокая надежность и производительность. Существует большой выбор коммерческого и свободного программного обеспечения для организации облачных вычислений в центрах обработки данных (ЦОД). Это позволяет организациям создать собственную инфраструктуру с учетом требуемых характеристик обеспечения надежности и безопасности при обработке данных.

При организации облачного сервиса необходимо определиться между частной и гибридной моделью развертывания облака, распределить функциональные задачи и обеспечить их взаимодействие с учетом требований безопасности и масштабируемости. Для многих компании будет целесообразно использование гибридной модели развертывания, предоставить выполнение высо-

конагруженных операций внешним провайдерам облачных вычислений.

Услуга «инфраструктура как сервис» является наиболее распространенной и служит базисом для остальных моделей обслуживания. Объектами облачной инфраструктуры являются виртуальные машины, сервисы, программы, наборы данных, заявки; позициями — вычислительные узлы, устройства памяти, места в очередях на исполнение.

Показателем качества считается время отклика системы на запрос пользователя. При его анализе инфраструктура играет ключевую роль в вопросах надежности функционирования. При этом рассматривается ряд таких характеристик, как интенсивность поступающих запросов, степень загрузки центральных устройств, интенсивность межмашинного взаимодействия. Технологические операции могут существенно повлиять на функционирование основных задач, например, при миграции виртуальных сред между узлами, интенсивной репликации данных при восстановлении отказа аппаратных устройств. В соответствии с этим необходимо решение оптимизационных задач, связанных с распределением и использованием ресурсов, составлением расписаний миграции серверов.

Выполнение показателей качества тесно связано с организационной моделью облачной инфраструктуры и характеристиками аппаратного обеспечения. На скорость технологических операций оказывает существенное влияние организация распределенной файловой системы между узлами вычислительного кластера. Она используется для репликации дисковых образов и оперативной памяти виртуальной среды, обмена конфигурационных настроек и диагностики смежных узлов отказоустойчивого кластера.

Первый вариант организации распределенной файловой системы использует централизованную систему хранения данных (СХД). Существует широкий выбор аппаратных решений с различным уровнем производительности и вариантами подключения. Время миграции виртуальной инфраструктуры между рабочими серверами минимально и не требует переноса данных.

В качестве недостатков следует отменить высокую стоимость приобретения и обслуживания СХД, а также критичность расположения данных на одном устройстве, что требует создание резервной СХД.

Второй вариант использует распределенную файловую систему, где каждый из серверов может являться элементом хранения данных (рис. 1).

Большинство серверов способно справиться с подобной нагрузкой с помощью дополнительных сетевых адаптеров для организации внутренней кластерной сети. Каждый сервер дол-

жен иметь один дисковый раздел для установки операционной системы управления кластером. Вычислительные сервера (node1, node2, node3) должны иметь дополнительный быстродействующий жесткий диск в качестве внутреннего кэша. Общий объем распределенной файловой системы определяется по суммарному числу жестких дисков всех серверов и используемой схемой резервирования. Целесообразно равномерно распределить объем файловой системы между серверами.

Достоинства:

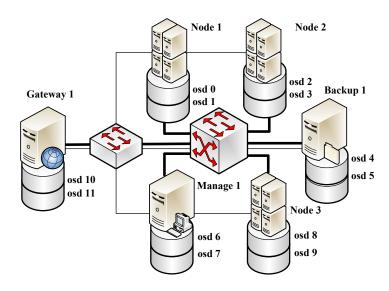
- более низкая стоимость решения по сравнению с централизованной СХД;
- независимость от типа и объема жесткого диска, важен только их суммарный объем.

Ограничением данного варианта является скорость магистральных каналов, от которой зависит максимальное число серверов в группе и время миграции виртуальных сред.

Существующие методы повышения надежности и устойчивости вычислительных систем основаны на резервировании элементов: жесткий диск, канал связи, сервер, но не рассматривается проблема существования критически важных факторов, которые приводят к дестабилизации и отказу работы всей системы [1–3]. В работах нет подробных исследований о влиянии различных предшествующих состояний серверов в момент возникновения отказа, в период распределения нагрузки. Необходим также анализ ситуаций восстановления исходной структуры кластеров после устранения неисправности.

Рассмотрим это на примере синхронизированного по времени графика сетевой нагрузки магистрального канала вычислительных серверов кластера (рис. 2).

Графики наглядно демонстрируют соотношение нагрузки между обслуживанием одной вир-



Puc. 1. Вариант организации распределенной файловой системой между серверами

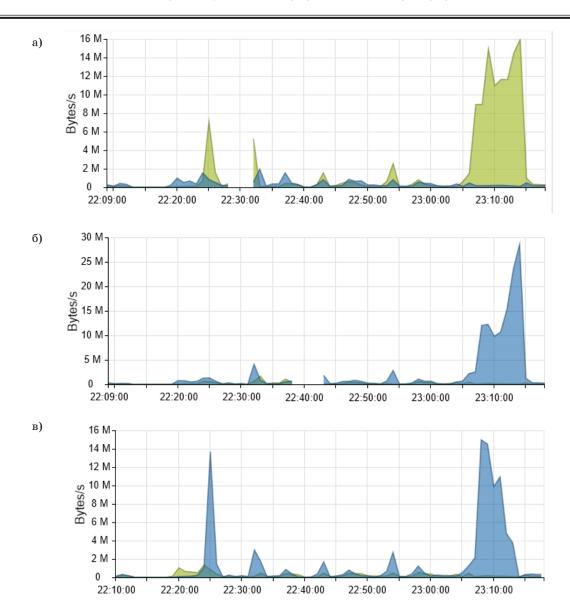


Рис. 2. Демонстрация различных режимов работы кластера из 3-х серверов на примере синхронизированных графиков нагрузки магистрального канала по входящему (желтый) и исходящему (синий) трафику: а – узел node1; б – узел node2; в – узел node3

туальной машины и технологическими операциями для различных нештатных ситуаций:

- 22:10–22:15 работа виртуальной среды в штатном режиме на node3;
- -22:17-22:27 миграция активной виртуальной среды на node1;
- 22:27–22:37 аварийное отключение node1, восстановление виртуальной среды на node2, репликация данных после восстановления node1;
- 22:37–22:50 перезагрузка узла node2, подготовка и миграция виртуальной среды на node1;
- -22:50-23:03 отключение одного неисправного диска на node1, образ диска виртуальной среды реплицируется между node2 и node3;
- 23:03-23:16 подключение исправного диска на node1, восстановление данных распределенной файловой системы от серверов node2 и node3.

Подключение исправного жесткого диска запустит задачу репликации блоков данных. Недостаточная ширина магистрального канала может привести к значительному увеличению времени репликации данных. При ограниченных ресурсах возрастает риск потери устойчивости. Ситуация с отключением и восстановлением одной единицы оборудования демонстрирует актуальность проблемы выбора аппаратной конфигурации облачного сервиса. К данным ситуациям необходимо быть заранее готовым и планировать регламентные работы по обслуживанию инфраструктуры.

В качестве решения предлагается сбор диагностической данных о характеристиках работы оборудования. Для оценки жестких дисков сигналом к действию может стать резкое увеличение времени чтения/записи данных, финальной

ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

стадией которой является появление сбойных секторов. Сервера и СХД обладают данными системами мониторинга, но команда репликации данных на резервный жесткий диск горячей замены поступит только после фиксации определенного числа ошибок записи.

Оптимальным действием после получения тревожного сигнала будет планирование постепенного переноса данных на подготовленный для замены жесткий диск. Для централизованных СХД метод миграции данных происходит в момент отключения несправного жесткого диска, восстановленные данные поступают на резервный диск только от остальных исправных дисков RAID-массива. Для распределенных файловых систем кластера данные поступают по магистральному каналу от остальных серверов группы.

Разработчикам распределенных файловых систем предлагается следующий алгоритм для реализации метода мягкого переноса данных с минимизацией трафика магистрального канала:

- 1) устанавливается новый исправный жесткий диск и активируется режим переноса данных от еще работающего, но претендующего на замену жесткого диска;
- 2) интенсивный перенос блоков данных выполняется в перерывах между полезным использованием заменяемого жесткого диска;
- 3) корректность блока данных проверяется по контрольной сумме, сбойные блоки игнорируются и запрашиваются от других серверов;
- 4) при чтении данных из заменяемого диска блок данных записывается на новый диск с присвоением ему нового адреса в файловой таблице;

5) запись нового блока или внесение изменений в используемый блок данных происходит сразу на новый диск с корректировкой его адреса в файловой таблице.

Дальнейшее исследование задачи обоснования параметров облачных систем для повышения надежности и оперативности облачных вычислений целесообразно продолжить в следующих направлениях:

- совместное рассмотрение характеристик оперативности и надежности функционирования облачных систем с учетом разнообразия прикладных виртуальных сред;
- анализ вопросов оценки надежности облачных систем при различной конфигурации рабочих серверов.

Библиографический список

- 1. Гудкова И.А., Масловская Н.Д. Вероятностная модель для анализа задержки доступа к инфраструктуре облачных вычислений с системой мониторинга // Т-Сомт: Телекоммуникации и транспорт. 2014. №6. С. 13–15.
- 2. Мокров Е. В., Чукарин А. В. Анализ показателей эффективности системы облачных вычислений с миграцией серверов // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2014. №8. С. 64–67.
- 3. Самуйлов К. Е., Зарядов И. С., Горбунова А. В. Анализ времени отклика системы облачных вычислений // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. №11. С. 57–61.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Акопов Владимир Сергеевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов - управление локальными системами, моделирование движения транспортных средств.

vakopov@yandex.ru



Борисов Олег Игоревич

кандидат технических наук, ассистент. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.

borisov@corp.ifmo.ru



Андрианов Павел Павлович

штурманско-гидрографичекурсант ского факультета.

Военный институт (военно-морской) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия».

Область научных интересов - применение и эксплуатация робототехнических комплексов военного назначения, информационно-управляющие техно-



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



Армашова-Тельник Галина **С**еменовна

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.

atgs@yandex.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



Богуславский Андрей Александрович

доктор физико-математических наук, доцент.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Область научных интересов – системы технического зрения реального времени, методы программирования систем реального времени, обработка изо-. бражений.

anbq74@mail.ru



Ватаева Елизавета Юрьевна

ассистент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов - синтез нелинейных систем автоматического управления.



Болтнева Анна Владимировна

студентка кафедры электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электрические машины.

Ann.boltneva@mail.ru



Виграненко Юрий Трофимович

доктор химических наук,

профессор кафедры неорганической и аналитической химии.

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова.

Область научных интересов - каталитический синтез органических соединений с использованием карбонильных комплексов металлов. lta4455@yandex.ru



Волохов Михаил Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – информационные электрические микромашины, адаптивное и интеллектуальное управление работами и РТС. kaf 32@aanet.ru



Гречкин Никита Леонидович

студент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – мехатроника, робототехника, системы управления.

kotos357@mail.ru



Галкина Дарья Алексеевна

студентка.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.

Область научных интересов – системы автоматического управления darja. qalkina@qmail.com



Долгов Алексей Алексеевич

соискатель.

Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Минобороны России.

Область научных интересов – обработка информации, эргономика, криминология.

gniiivm-d@yandex.ru



Галкин Илья Алексеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения

Военный институт (военно-морской) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Область научных интересов – применение и эксплуатация робототехнических комплексов военного назначения, информационно-управляющие технологии.

ilyaalgalkin@gmail.com



Едемский Александр Юрьевич

программист лаборатории автономных робототехнических систем.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.

Область научных интересов – анализ данных, интернет вещей, передача мультимедийных данных. qapple@ya.ru



Гниденко Андрей Сергеевич

аспирант.

Санкі-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.

Область научных интересов – моделирование, планирование операций juca. deoliveira88@gmail.com



Елина Татьяна Николаевна,

кандидат экономических наук, доцент кафедры технологий защиты информации.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление проектами, нейро-нечеткие системы, экспертные системы, экономикоматематическое моделирование. elinatn@yandex.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



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.

bkelt1@yandex.ru



Елтышева Ирина Владимировна старший преподаватель.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – становление практико-ориентированного направления в образовании. eltiv1@yandex.ru



Киреев Кирилл Вадимович

ведущий специалист.

Отдел организации технологического присоединения Департамента технологического присоединения Исполнительного аппарата ПАО «МРСК Центра». Область научных интересов – технологическое присоединение к электрическим сетям, государственное регулирование электроэнергетической отрасли, менеджмент и управление проектами в электроэнергетике. kireevkirill@list.ru



Есев Андрей Александрович

кандидат технических наук, начальник отделения.

Государственный летно-испытательный центр имени В. П. Чкалова.

область научных интересов – авиационное оборудование, авиационная акустика, авиационная эргономика. a.a.esev@yandex.ru



Киселева Елена Александровна

кандидат технических наук.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Область научных интересов – технология электрохимических процессов. kanna787@mail.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



Коваленко Анна Валериевна

ассистент кафедры «Электрические станции».

Донецкий национальный технический университет.

Область научных интересов – электрические станции, возобновляемые источники, релейная защита и автоматика.

anna.kovalenkoetf@gmail.com



Ичетовкин Егор Андреевич

студент Института инновационных технологий в электромеханике и энергетике.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление в технических системах. mels engineer@mail.ru



Козырь Полина Сергеевна

студентка кафедры биотехнических систем и технологий.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – углеродные наноматериалы. olle 1998@mail.ru



Канавцев Михаил Владимирович

кандидат экономических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – цифровое неравенство, кибербезопасность, социология кибербезопасности, цифровые трансформации, стандарты переподготовки кадров. mykanavtsev@qmail.com



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. lta4455@yandex.ru



Крахмалев Олег Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных технологических систем, руководитель научно-исследовательской лаборатории «Мехатроника и робототехника».

Брянский государственный технический университет.

Область научных интересов - математическое моделирование и управление манипуляционными роботами. olegkr64@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



Криволапчук Игорь Григорьевич

старший преподаватель кафедры управления в технических системах. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – авиационные тренажеры, системы управле-



Сергей Юрьевич

магистрант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление режимами электроэнергетических систем

serzh.lach@mail.ru



Крылова Татьяна Егоровна

старший преподаватель кафедры технической физики, электромеханики и робототехники. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов - катализаторы и каталитические системы в карбонильных комплексах кобальта, наноструктурированные сенсорные системы.

Krylova_tatjana@mail.ru



Лелин Федор Владимирович

лаборант.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Область научных интересов - теплоэнергетика.

feodorio_ljolin@rambler.ru



Кудрин Вадим Евгеньевич

студент.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – машинное обучение.

kudrinvad@mail.ru



Ляшенко Александр Леонидович

кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управле-

Санкт-Петербургский горный университет.

Область научных интересов - анализ и синтез систем с распределенными параметрами частотными методами. akuna matata kmv@mail.ru



Кукушкин Денис Валерьевич

Ведущий инженер-конструктор. ПАО «Силовые машины». Область научных интересов - возбуждение синхронных генераторов, полупроводниковые преобразователи. Kukushkin_DV@spb.power-m.ru



Максимова Ирина Федоровна

научный сотрудник института электрофизики и электроэнергетики.

Институт электрофизики и электроэнергетики.

Область научных интересов - электроэлектромеханические энергетика, преобразователи нетрадиционной конструкции, интеллектуальные материалы, солнечная энергетика, накопители энергии.



Малов Дмитрий Александрович

аспирант, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.

Область научных интересов - анализ данных, интернет вещей, передача мультимедийных данных malovdmitrij@gmail.ru



Павлюков Валерий Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры электрические станции.

Донецкий национальный технический университет.

Область научных интересов – электрические станции, возобновляемые источники, релейная защита и автоматика. САПР.

avlukovva@gmail.com



Мартынов Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики. электромеханики и робототехники. Санкт-Петербургский государствен-

ный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов - электро-

механика: электрические машины и полупроводниковая преобразовательная техника.

Martynov41@mail.ru



Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент. Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева.

Область научных интересов - диагностика систем электроснабжения.



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



Платонов Валерий Павлович

кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов - информационные электромашинные устройства автоматики.

kaf_32@aanet.ru



Мыльников Владимир Аркадьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры технологий защиты инфор-

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов - облачные вычисления, распределенные информационные системы, имитационное моделирование, нейронные сети va.mylnikov@yandex.ru



Положенцев Дмитрий Сергеевич

инженер 1-й категории.

АО «Научно-исследовательский институт командных приборов», Санкт-Петербург.

Область научных интересов – системы автоматического управления, силовой электропривод.

ds6476564@yandex.ru



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



Полякова Татьяна Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов - интеллектуальные системы автоматического управления.

tgp@acts.aanet.ru



Потрясаев Семен Алексеевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИ-РАН).

Область научных интересов – комплексное моделирование, системы поддержки принятия решений. spotryasaev@gmail.com



Сепп Юрий Иосифович

кандидат технических наук, доцент кафедры работотехники и автоматизации производственных систем.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

Область научных интересов – виброакустика электромеханических систем, микроэлектромеханические системы. yus@ieee.org



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



Сердитов Владислав Альбертович

кандидат технических наук, доцент кафедры программно-целевого управления в приборостроении.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – надежность человека, ERP системы, моделирование производственных процессов, безопасность производственных процессов и производств, менеджмент в электроэнергетике. vladlen04@mail.ru



Савельев Антон Игоревич

кандидат технических наук.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук.

Область научных интересов – пиринговые сети, передача мультимедийных данных, робототехника, «Интернет вещей».

saveliev.ais@yandex.ru



Сериков Сергей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики и робототехники.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системы и процессы управления, применение интеллектуальных технологий для решения прикладных задач. srkv@inbox.ru



Салова Ирина Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических си-

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование методом конечных элементов.

salova_irine@mail.ru



Серикова Елена Андреевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматы».

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Область научных интересов – автома-

тизация производственных процессов, информатика. wdv08@inbox.ru



Семенова Вероника Алексеевна

кандидат экономических наук, профессор кафедры информатики.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – энергоэффективность и энергосбрежение. 9767871@mail.ru



Соколов Борис Владимирович

доктор технических наук,профессор, заместитель директора СПИИРАН по научной работе.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИ-РАН).

Область научных интересов – комплексное моделирование, системы поддержки принятия решений. sokol@iias.spb.su



Соколов Сергей Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор.

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН.

Область научных интересов – робототехника, системы технического зрения реального времени. sokolsm@keldvsh.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.

kaf_32@aanet.ru



Соленая Оксана Ярославовна

кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности; развитие методов оценки безопасности технологических объектов.



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.



Соленый Сергей Валентинович

кандидат технических наук, доцент кафедры технической физики, 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. ssv555ssv@yandex.ru



Федоров Николай Игоревич

студент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

Область научных интересов – электромеханика.

nikolayfedorov@list.ru



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



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. mukhlenova@mail.ru



Ткаченко Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрические станции».

Донецкий национальный технический университет.

Область научных интересов – электрические станции, возобновляемые источники, релейная защита и автоматика.

tsn1981@mail.ru



Харитонов Владимир Васильевич

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник. Государственный летно-испытательный центр имени В. П. Чкалова. Область научных интересов – авиационное оборудование, авиационная акустика, авиационная эргономика.

gniiivm-h@yandex.ru

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'2018



Чернышева Ольга Борисовна

ассистент кафедры технической физики, электромеханики и робототехники. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математические методы исследования систем реального времени; прикладное программирование.



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.



Чотчаев Руслан Ханапиевич

адъюнкт.

Военный институт (военно-морской) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия».

Область научных интересов – защита информации, информационные технологии.



Шишлаков Дмитрий Владиславович

кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – многосвязные системы автоматического управления.



Чухно Даниил Романович

студент.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – машинное обучение.

Danisimo890@mail.ru



Якимовский Дмитрий Олегович

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отделения.

Научно-исследовательский институт командных приборов.

Область научных интересов – прецизионное приборостроение. yakimovsky@yandex.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

СОДЕРЖАНИЕ

Акопов В. С., Салова И. А. Исследование влияния материала водопроводных труб на процессы теплообмена в них	3	Першин И. М., Ляшенко А. Л. Анализ систем с распределенными параметрами с применением частотных критериев качества	78
Борисов О. И., Галкина Д.А. Траекторное управление волновыми глайдерами при формировании системы управления подводными объектами в неизвестной окружающей среде	12	механических датчиков угла	., 89
Бураков М. В. Использование нейронной сети хопфилда для идентификации динамического объекта	15 20	Соколов Б. В., Потрясаев С. А., Гниденко А. С Комплексное моделирование и комбини- рованные методы планирования функцио- нирования железнодорожных составов, входящих в транспортно-логистическую сеть	C. 99
Бураков М. В. Генетический синтез модального регулятора	25	Шишлаков В. Ф., Криволапчук И. Г., Ватаева Е. Ю. Полунатурный исследовательский комплекс систем	100
модификация адаптивной системы с идентификатором	31	Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В., Ватаева Е. Ю., Решетникова Н. В. Синтез параметров законов управления нелинейных САУ при полиномиальной	108 114
системе ВМ Φ	36 39	Якимовский Д. О., Положенцев Д. С. Повышение чувствительности исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса при отработке малых скоростей	
Голубков В. А., Федоренко А. Г. Оценка начальных технических состояний электромеханических устройств	43	Волохов М. А. Платонов В. П. Диагностика технологических дефектов	119
Ефимов А.А., Бардинский С.И., Мельни- ков С.Ю. Инженерная методика расчета магнитных полей в конструкциях устройств силовой электроники	45	Киселева Е. А., Лелин Ф. В. Исследование структурных характеристик электродов накопителей энергии, используемых	125
Ефимов А. А. Системы релейного управ- ления активным выпрямителем тока	51	в энергетических установках на основе возобновляемых источников энергии Кукушкин Д. В. Способ гашения магнит-	128
Шишлаков В. Ф., Курбанов В. Г., Бураков М. В. Решение обратной задачи кинематики интеллектуальных		ного поля обмотки возбуждения	133
электромеханических систем	63	Mартынов A. A., Чернышева O. Б. К расчету параметров волногенератора поплавкового типа	138
генетического алгоритма	67	Павлюков В. А., Ткаченко С. Н., Коваленко А. В. Разработка сапр электрической части станций и подстан- ций для учебного процесса	145
теплоносителя в активной зоне атомного	73	A , 200 MPO	_ 10

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'2018

Сепп Ю. И., Федоров Н. И. Определение потоков колебательной энергии от электродинамических взаимодействий в системах с токопроводящими элементами	154	Киселева Е. А., Василенко А. А. Газодиффу- зионные слои из функциональных углеродных материалов для топливных элементов, используемых в энергетических установках	240
Соленая О. Я., Лач С. Ю. Моделирование аварийных режимов электроэнергетических систем	160	де Векки А. В., Виграненко Ю. Т., Кочере- гин С. Б., Крылова Т. Е. Окисление 2- пентил 1- ноненаля в присутствии водного раствора гидроксида натрия	244
Тимофеев С. С., Максимова И. Ф. Проблемы использования солнечных энергетических установок в россии и мире	167	Николаев Ю. С., Козырь П. С. Химия искусственных мышц: новые перспективы на основе использования углеродных наноструктурных материалов	247
рующие устройства	176 181	Фомичева Т. И. Использование отходов целлюлозно-бумажного производства для получения активных углей	251
Крахмалев О. Н. Метод структурных мутаций в моделях манипуляционных систем роботов	188	Елтышев Б. К., Елтышева И. В. О постановке задачи имитационного моделирования функционирования систем защиты информации	253
Савельев А. И., Едемский А. Ю., Малов Д. А., Чухно Д. Р., Кудрин В. Д. Передача служебных и мультимедийных данных в іот-сетях с использованием гибридных устройств связи для проактивной локализации и навигации пользователя в киберфизическом пространстве	195	Мыльников В. А., Елина Т. Н. Анализ причин нарушения устойчивости облачных систем с учетом требований надежности и оперативности	258 262
Соколов С. М., Богуславский А. А., Беклемишев Н. Д. Программное обеспечение систем технического зрения реального времени для систем управления робототехническими комплексами	205		
Харитонов В. В., Есев А. А., Долгов А. А. Психофизиологические аспекты интерактивного речевого взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами в авиации	212		
Армашова-Тельник Г.С., Канавцев М.В., Сердитов В.А. Новые знания и компетенции, востребованные на технологических предприятиях	217		
Армашова-тельник Γ . С., Канавцев M . В., Сердитов B . А. Эволюция систем поддержки принятия управленческих решений в промышленности	222		
Киреев К. В. Особенности законодательства российской федерации и предложения по изменению процедуры технологического присоединения к электрическим сетям			
Семёнова В. А., Свешников К. Д. Особенности и требования проведения энергоаудита социальных организаций	232		
Семёнова В. А. Управление производственным потенциалом энергетических компаний.	237		

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ '18

Сборник докладов

16-20 апреля 2018 г.

Ответственный за выпуск: д-р техн. наук, профессор B Φ . Muunakos

Редакторы: В. С. Гончарова, Л. И. Корнеева Компьютерная верстка А. Н. Колешко

Подписано к печати 14.06.18. Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 32,0. Уч.-изд. л. 36,9. Тираж 150 экз. Заказ № 273.

Редакционно-издательский центр ГУАП 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67