

3(70)/2014

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder

«Information and Control Systems», Ltd.

Editor-in-Chief

M. Sergeev

Dr. Sc. Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief

E. Krouk

Dr. Sc. Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Council

L. Chubraeva

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

B. Meyer

PhD, Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc. Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov

Dr. Sc. Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board

V. Anisimov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc. Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc. Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin

Dr. Sc. Tech., Professor, Minsk, Belarus

V. Khimenko

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Melekhin

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc. Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc. Phys.-Math., Vologda, Russia

Editor: A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** A. Koleshko, M. Chernenko**Layout and composition:** N. Karavaeva**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: ius.spb@gmail.com

Tel.: +7 - 812 494 70 02

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue: № 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

© Corporate authors, 2014

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS**Viktorov D. S., Chislov S. G.** Method of Correction of the Non-Linear Distortions Entered by an Analog Key in Probing Signals 2**Turubanov M. A., Shishlakov V. F., Shyshlakov A. V.** Impulse Control System for Combined Solar and Wind Installation with Superconductor Equipment 8**Zakharova O. L., Kirsanova J. A., Kniga E. V., Zharinov I. O.** Algorithms and Software of Testing Onboard Digital Computer Systems Integrated Modular Avionics 19**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Kuchmin A. Yu.** Modeling of Equivalent Stiffness of Adaptive Platforms with the Parallel Structure Executive Mechanism 30**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES****Balonin N. A., Marley V. E., Sergeev M. B.** New Opportunities of the Mathematical Network for Collaborative Research and Modeling in the Internet 40**Marakhovsky V. B.** CMOS Implementation of the Trainee's Threshold Logical Element. Part I. Design and Training Diagram 47**Kolchin I. V., Filippov S. N.** The Architecture of Bare-Metal Real-Time Microhypervisor and Automated Measurement of Time Response 57**Shoshmina I. V.** A Methodology of Eliciting Context Requirements to Program Logic Control Systems 68**INFORMATION SECURITY****Bezzateev S. V., Voloshina N. V., Sankin P. S.** Safety Analysis Methodology of Complex Systems Taking Into Account the Threats to Information Security 78**Boyko A. A., Djakova A. V.** Method of Developing Test Remote Information-Technical Impacts on Spatially Distributed Systems of Information-Technical Tools 84**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION****Cheprukov Yu. V., Socolov M. A.** Correlation Characteristics and Application of Some Binary Codes 93**Alekseev M. O.** On the Detection of Algebraic Manipulations by Means of Multiplication Operation 103**INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS****Allakhverdiyeva N. R.** Development of a Method for Improving the Accuracy of the Measuring Channel 109**INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION****D'yachuk P. P., Loginov D. A., Karabalykov S. A.** Synergetic Approach to Management of Educational Activity in Verbal Problem Environments 118**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS****Tichonov E. P.** Adaptive Filtering Algorithms Electrocardiogram High Time Resolution Part I. Background Information and Analysis Approach to Solving the Problem 125**CHRONICLES AND INFORMATION****IV International Forum «TELECOM NETWORKS 2.0. Sharing, Engineering, Outsourcing, Development & Metering»** 132**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS** 134

Submitted for publication 07.04.14. Passed for printing 17.06.14. Format 60×84/8. Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:
Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К. Кристоделу,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария
Ю. Ф. Подоплекин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ
Л. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:
В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ
Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль
А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь
А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. А. Шалыто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: Н. Н. Караваева

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2014

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Викторов Д. С., Числов С. Г. Метод коррекции нелинейных искажений, вносимых аналоговым ключом в зондирующие сигналы 2

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Турубанов М. А., Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В. Импульсная система управления комбинированной солнечно- и ветроэнергетической установкой со сверхпроводниковым оборудованием 8
Захарова О. Л., Кирсанова Ю. А., Книга Е. В., Жаринов И. О. Алгоритмы и программные средства тестирования бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики 19

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Кучмин А. Ю. Моделирование эквивалентной жесткости адаптивных платформ с исполнительными механизмами параллельной структуры 30

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Балонин Н. А., Марлей В. Е., Сергеев М. Б. Новые возможности математической сети для коллективных исследований и моделирования в Интернете 40
Мараховский В. Б. КМОП-реализация обучаемого порогового логического элемента. Часть 1: Проектирование и схема обучения 47
Колчин И. В., Филиппов С. Н. Архитектура автономного микро-гипервизора реального времени и автоматизированное измерение его временных характеристик 57
Шошмина И. В. Методика составления контекстных требований к программным системам логического управления 68

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Беззатеев С. В., Волошина Н. В., Санкин П. С. Методика расчета надежности сложных систем, учитывающая угрозы информационной безопасности 78
Бойко А. А., Дьякова А. В. Способ разработки тестовых удаленных информационно-технических воздействий на пространственно распределенные системы информационно-технических средств 84

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Чепруков Ю. В., Соколов М. А. Корреляционные характеристики и применение некоторых бинарных R3-кодов 93
Алексеев М. О. Об обнаружении алгебраических манипуляций с помощью операции умножения 103

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Аллахвердиева Н. Р. Разработка метода повышения точности измерительного канала 109

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

Дьячук П. П., Логинов Д. А., Карабалыков С. А. Синергетический подход к управлению учебной деятельностью в вербальных проблемных средах 118

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Тихонов Э. П. Адаптивные алгоритмы фильтрации и фрагментации электрокардиограмм высокого временного разрешения. Часть 1: Исходные сведения и анализ подхода к решению проблемы 125

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

IV Международный Форум «TELECOM NETWORKS 2.0. Sharing, Engineering, Outsourcing, Development & Metering» 132

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

134

Сдано в набор 07.04.14. Подписано в печать 17.06.14. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0. Уч.-изд. л. 20,1. Тираж 1000 экз. Заказ 258.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 681.51

ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ СОЛНЕЧНО- И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ СО СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

М. А. Турубанов^а, заведующий вычислительной лабораторией

В. Ф. Шишлаков^а, доктор техн. наук, профессор

А. В. Шишлаков^б, инженер-программист

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бОАО «Концерн «НПО «Аврора», Санкт-Петербург, РФ

Цель: рассматривается реализованная на контроллере система управления электроэнергетическим комплексом открытой архитектуры со сверхпроводниковым оборудованием. **Метод:** для решения задачи синтеза алгоритма управления применяется обращение прямого вариационного метода анализа — обобщенного метода Галеркина. **Результаты:** получены рекуррентные аналитические соотношения вида «вход-выход», определяющие интегралы Галеркина для нелинейных характеристик, аппроксимированных аналитически, в случае импульсных экспоненциальных процессов на их входах, применение которых позволило полностью алгебраизировать решение задачи синтеза импульсных систем автоматического управления с данным видом аппроксимации нелинейных характеристик. **Практическая значимость:** разработанные теоретические положения, основывающиеся на обобщенном методе Галеркина, позволили распространить данный математический аппарат на импульсные системы автоматического управления при аналитической аппроксимации нелинейных статических характеристик. Практическая ценность результатов исследований заключается в создании системы автоматического управления комбинированной электроэнергетической установкой со сверхпроводниковыми элементами и устройствами.

Ключевые слова — сверхпроводниковое оборудование, электроэнергетическая установка, аналитическая аппроксимация, импульсные нелинейные системы, обобщенный метод Галеркина.

Введение

Во всех передовых странах мира ведутся исследования по разработке и созданию электроэнергетических систем и комплексов с возобновляемым видом энергии (так называемые «зеленые» станции). Это дает возможность уменьшить затраты, связанные с добычей, транспортировкой и переработкой углеводородного сырья, и существенно улучшить экологическую ситуацию.

Ветряные электростанции строят в местах с высокой средней скоростью ветра — от 4,5 м/с и выше. Предварительно проводятся исследования потенциала местности. Анемометры устанавливаются на высоте от 30 до 100 м и в течение одного-двух лет собирают информацию о скорости и направлении ветра. Полученные сведения могут объединяться в карты доступности энергии ветра. Такие карты (и специальное программное обеспечение) позволяют потенциальным инвесторам оценить скорость окупаемости проекта. Обычные метеорологические сведения о скоростях ветра не подходят для строительства ветряных электростанций, поскольку собираются на уровне земли (до 10 м), в черте городов и аэропортах. Ветряные электростанции делятся на четыре типа: наземные, шельфовые, прибрежные и плавающие.

Самый распространенный в настоящее время тип ветряных электростанций — *наземный*.

Ветрогенераторы устанавливаются на холмах или возвышенностях. Электростанция соединяется кабелем с передающей электрической сетью. Крупнейшей на данный момент ветряной электростанцией является электростанция в городе Роско, штат Техас, США. Ветроэнергетическая система Роско была запущена 1 октября 2009 года немецким энергоконцерном E.ON. Станция состоит из 627 ветряных турбин производства Mitsubishi, General Electric и Siemens. Полная мощность — около 780 МВт. Площадь электростанции не менее 400 км².

Прибрежные ветряные электростанции строят на небольшом удалении от берега моря или океана. На побережье с суточной периодичностью дует бриз, что вызвано неравномерным нагреванием поверхности суши и водоема. Дневной, или морской, бриз движется с водной поверхности на сушу, а ночной, или береговой — с остывшего побережья к водоему.

Шельфовые ветряные электростанции строят в море на расстоянии 10–60 км от берега на участках моря с небольшой глубиной, поскольку башни ветрогенераторов устанавливают на фундаменты из свай, забитых на глубину до 30 м. Электроэнергия передается на землю по подводным кабелям. Шельфовые электростанции более дороги в строительстве, чем их наземные аналоги. Для генераторов требуются более высокие башни и более массивные фундаменты, кроме

того, необходимо учитывать, что соленая морская вода может приводить к коррозии металлических конструкций. Вместе с тем они обладают рядом преимуществ — не занимают землю и имеют большую эффективность из-за регулярных морских ветров.

За 2008 г. во всем мире было построено шельфовых электростанций мощностью 357 МВт; суммарные мощности к концу года составили 1471 МВт. Крупнейшей шельфовой станцией является электростанция Миддельгрюнден (Дания) с установленной мощностью 40 МВт.

Для строительства и обслуживания подобных электростанций используются самоподъемные суда.

Первый прототип *плавающей* ветряной турбины построен компанией H Technologies BV в декабре 2007 г. Ветрогенератор мощностью 80 кВт установлен на плавающей платформе в 10,6 морских милях от берега Южной Италии на участке моря глубиной 108 м.

Норвежская компания StatoilHydro совместно с компаниями Siemens и Technip разработала плавающий ветрогенератор для установки на большой глубине. В сентябре 2009 г. StatoilHydro построила демонстрационную версию Hуwind в 10 км от острова Кармой, неподалеку от юго-западного берега Норвегии. Мощность турбины — 2,3 МВт, масса — 5300 т, высота — 65 м; диаметр ротора — 82,4 м. Стальная башня ветрогенератора уходит под воду на глубину 100 м, над водой возвышаясь на 65 м. Для стабилизации и погружения конструкции на заданную глубину в нижней ее части размещен балласт (гравий и камни). От дрейфа платформу удерживают три троса с якорями, закрепленными на дне. Электроэнергия передается на берег по подводному кабелю.

Все **солнечные** электростанции (СЭС) подразделяют на несколько типов: башенного типа, тарельчатого типа, использующие фотобатареи, использующие параболические концентраторы, комбинированные, аэростатные.

Работа электростанций *башенного* типа основана на принципе получения водяного пара с использованием солнечной радиации. В центре станции стоит башня высотой от 18 до 24 м (в зависимости от мощности и некоторых других параметров высота может быть больше либо меньше), на вершине которой находится резервуар с водой. Этот резервуар покрашен в черный цвет для поглощения теплового излучения. Также в этой башне размещена насосная группа, доставляющая пар на турбогенератор, который находится вне башни. По кругу от башни на некотором расстоянии располагаются гелиостаты. Гелиостат — зеркало площадью несколько квадратных метров, закрепленное на опоре и подключенное к общей системе позиционирования.

То есть зеркало, в зависимости от положения солнца, будет менять свою ориентацию в пространстве. Основная и самая трудная задача — это позиционирование всех зеркал станции так, чтобы в любой момент времени все отраженные лучи от них попадали на резервуар. В ясную солнечную погоду температура в резервуаре может достигать 700 °С. Такие температурные параметры характерны для большинства традиционных тепловых электростанций, поэтому для получения энергии применяются стандартные турбины. Фактически на станциях такого типа можно получить сравнительно большой КПД (около 20 %) и высокие мощности.

Электростанции *тарельчатого* типа используют принцип получения электроэнергии, схожий с таковым у башенных СЭС, но есть отличия в конструкции самой станции. Станция состоит из отдельных модулей. Модуль состоит из опоры, на которую крепится ферменная конструкция приемника и отражателя. Приемник находится на некотором удалении от отражателя, и в нем концентрируются отраженные лучи солнца. Отражатель состоит из зеркал в форме тарелок (отсюда название), радиально расположенных на ферме. Диаметры этих зеркал достигают 2 м, а количество — нескольких десятков (в зависимости от мощности модуля). Такие станции могут состоять как из одного модуля (автономные), так и из нескольких десятков (работа параллельно с сетью).

В настоящее время очень распространены электростанции, состоящие из большого числа отдельных *модулей (фотобатарей)* различной мощности и выходных параметров. Данные СЭС широко применяются для энергообеспечения как малых, так и крупных объектов (частных коттеджей, пансионатов, санаториев, промышленных зданий и т. д.). Устанавливаться фотобатареи могут практически везде, начиная от кровли и фасада здания и заканчивая специально выделенными территориями. Установленные мощности тоже колеблются в широком диапазоне — от снабжения отдельных насосов до электроснабжения небольшого поселка.

Принцип работы *параболических концентраторов* заключается в нагревании теплоносителя до параметров, пригодных к использованию в турбогенераторе. Конструктивно данный вид электростанций представляет собой ферменную конструкцию, на которой устанавливается параболическое зеркало большой длины, а в фокусе параболы устанавливается трубка, по которой течет теплоноситель (чаще всего масло). Пройдя весь путь, теплоноситель разогревается и в теплообменных аппаратах отдает теплоту воде, которая превращается в пар и поступает на турбогенератор.

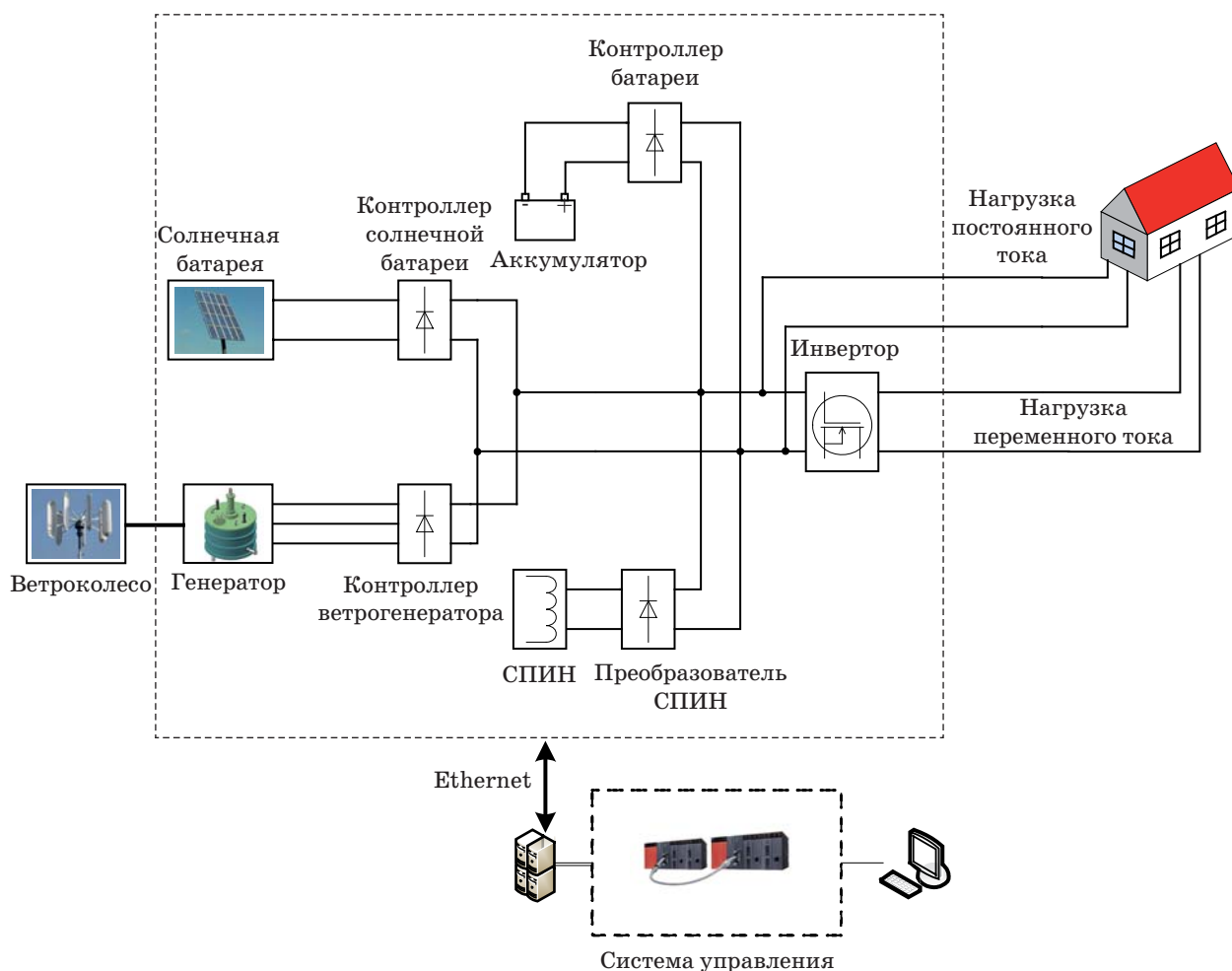
Одной из разновидностей электростанций с параболическими концентраторами являются СЭС, у которых в фокусе установлен двигатель Стирлинга. Существуют конструкции двигателей Стирлинга, которые непосредственно преобразуют колебания поршня в электрическую энергию, без использования кривошипно-шатунного механизма. Это позволяет достичь высокой эффективности преобразования энергии. Эффективность таких электростанций достигает 31,25 %. В качестве рабочего тела используется водород или гелий.

Часто на СЭС различных типов дополнительно устанавливают теплообменные аппараты для получения горячей воды, которая используется как для технических нужд, так и для горячего водоснабжения и отопления. В этом и состоит суть *комбинированных* СЭС. Также на одной территории возможна параллельная установка концентраторов и фотобатарей, что тоже считается комбинированной СЭС.

Во многих современных разработках повышения энергоэффективности при снижении мас-

согабаритных характеристик достигают путем применения элементов и устройств, работающих на основе эффекта сверхпроводимости [1, 2].

Вместе с тем вопросы, связанные с динамическими режимами работы электроэнергетических комплексов сверхпроводникового оборудования, проработаны крайне слабо, что вызвало необходимость разработки и создания в Институте инновационных технологий в электромеханике и энергетике (ИТЭЭ) ГУАП исследовательского комплекса открытой архитектуры. В состав данного комплекса входят сверхпроводниковый ветрогенератор мощностью 5 кВт, сверхпроводниковые силовые регуляторы тока (сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИН) и сверхпроводниковые ограничители тока), а также солнечная батарея [3]. Все оборудование комплекса, с точки зрения управления, как в нормальном, так и аварийных режимах обеспечивается контроллером, реализующим алгоритм управления, синтезированный обобщенным методом Галеркина (рис. 1).



■ Рис. 1. Структурная схема комбинированной сверхпроводниковой электроэнергетической установки

Поскольку электромеханические и электроэнергетические устройства, как правило, имеют гладкие нелинейные статические характеристики, то целесообразно [4] применять для их аппроксимации широко используемую в электротехнике аналитическую аппроксимацию. В этом случае статическая характеристика нелинейного звена представляется в виде конечной комбинации аналитических функций

$$F[x(t)] = \sum_{g=0}^l z_g (x(t))^g, \quad g = 0, 1, \dots, l, \quad (1)$$

где z_g — вещественные постоянные коэффициенты, значения которых определяются, например, как показано в работе [5].

Структура и состав комбинированной солнечно- и ветроэнергетической установки

Комбинированная солнечно- и ветроэнергетическая установка (СВУ) (рис. 2) была создана в ИТЭЭ ГУАП в рамках выполнения нескольких государственных контрактов Министерства образования и науки Российской Федерации. Проект установки экспонировался на Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2010 г.), где был отмечен дипломом I степени (с вручением золотой медали). Кроме того, были созданы действующие образцы отдельных элементов СВУ: сверхпроводниковый синхронный ветрогенератор (рис. 3) и сверхпроводниковые силовые регуляторы тока, — которые также экспонировались на Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2009 г.) и на Петербургской технической ярмарке (2013 г.), где были отмечены,

соответственно, дипломом I степени (с вручением золотой медали) за разработку «Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии» и дипломом II степени (с вручением серебряной медали) за разработку «Высокотемпературная сверхпроводниковая ветроэнергетическая установка».

Для реализации задач комплексных всесторонних исследований динамических режимов СВУ требовалось решить задачу разработки алгоритма управления всем электроэнергетическим комплексом, позволяющим не только исследовать штатные режимы работы, например выход на номинальный режим, но и моделировать аварийные режимы.

В качестве силового регулятора тока предлагается использовать СПИН, который будет работать в случае аварийных режимов, для компенсации провалов напряжения на момент переключения устройств защиты. При возникновении аварийной ситуации в большинстве случаев предусмотрена возможность переключения на аварийные источники питания с помощью электромеханических устройств, имеющих запаздывание в срабатывании (до 20 мс). Запаздывание может приводить к кратковременным провалам напряжения и, как следствие, выходу из строя особо чувствительного оборудования.

Связь накопителя с сетью или нагрузкой осуществляется через полупроводниковый преобразователь, причем по отношению к энергосистеме сверхпроводниковый накопитель и преобразователь выступают как единый объект с обобщенными характеристиками. В рассматриваемом случае в качестве преобразователя возможно использовать стабилизатор напряжения, который может быть выполнен на основе пассивных компонентов (автомата гашения поля, газового разрядника, варистора, стабилитрона и т. п.) либо



■ Рис. 2. Комбинированная СВУ со сверхпроводниковым оборудованием



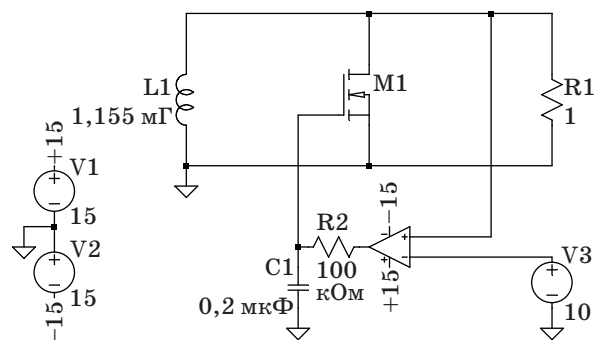
■ **Рис. 3.** Сверхпроводниковый ветрогенератор мощностью 5 кВт

на основе активных компонентов (транзисторного стабилизатора). Однако в случае использования пассивных элементов для стабилизации напряжения выходное напряжение может изменяться в относительно большом диапазоне, что вызывает большие потери энергии по сравнению с активными схемами стабилизации.

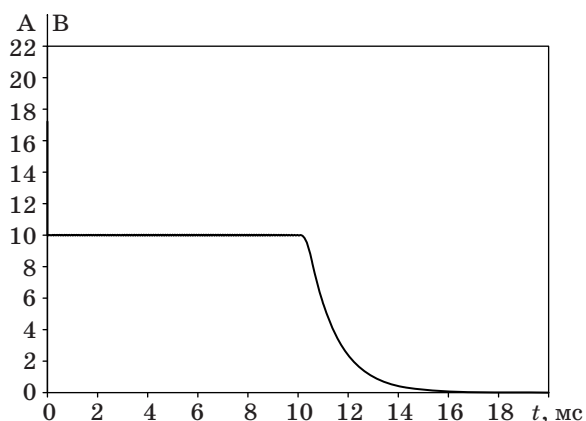
Представленная на рис. 4 модель системы СПИН — полупроводниковый стабилизатор напряжения — собрана с использованием прикладной программной среды LTspice. Параметры накопителя и нагрузки:

- индуктивность накопителя — 1,22 мГн
- рабочий ток — 100 А
- запасенная энергия — 6 Дж
- расчетный критический ток накопителя — 144 А
- номинальная нагрузка — 1 Ом
- напряжение стабилизации — 10 В
- время стабилизации напряжения — 10 мс
- тип провода — DI-BSCCO Type-H
- критический ток провода — 180 А
- внутренний радиус накопителя — 34 мм
- внешний радиус накопителя — 38,6 мм
- высота накопителя — 40,8 мм
- количество слоев намотки — 14
- количество витков в слое — 10
- общее количество витков — 140
- расход провода — 32 м
- масса накопителя — 0,45 кг

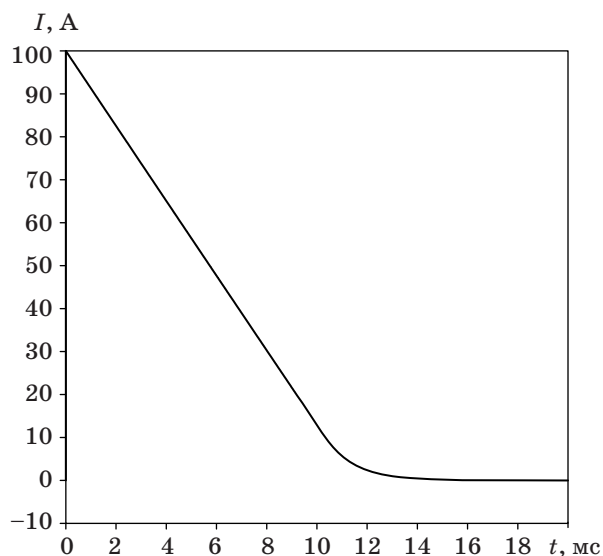
Индуктивный накопитель обеспечивает стабилизацию напряжения на заданном временном интервале (рис. 5, 6), из чего можно сделать



■ **Рис. 4.** SPICE модель индуктивного накопителя



■ **Рис. 5.** Кривые разряда СПИН: ток и напряжение на нагрузке



■ **Рис. 6.** Кривая разряда накопителя энергии

вывод о пригодности использования СПИН для стабилизации напряжения на коротких временных интервалах, обусловленных срабатыванием устройств защиты в цепи постоянного тока.

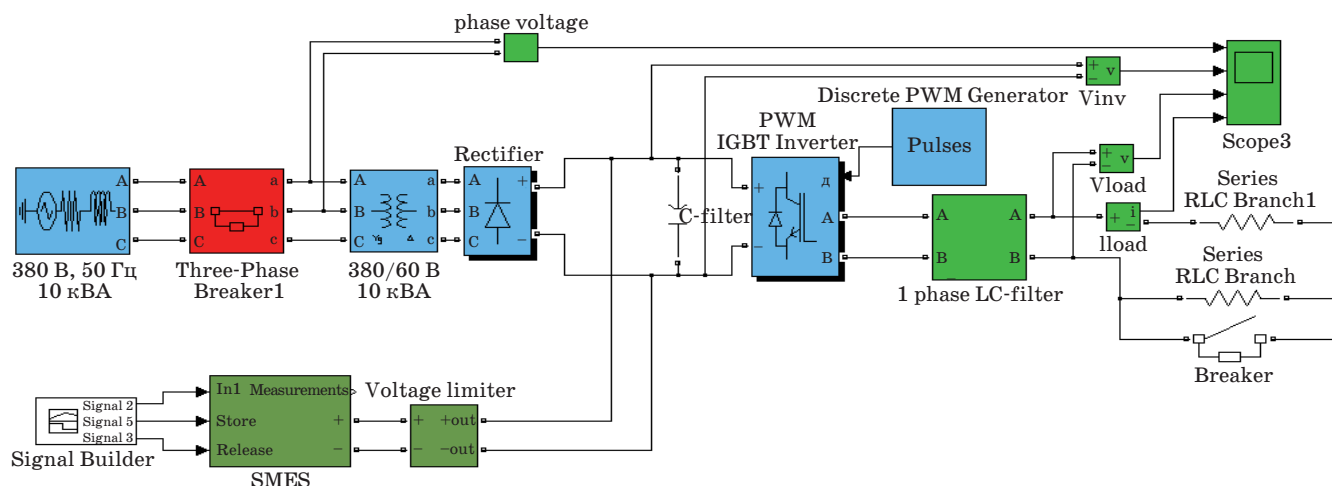


Рис. 7. Модель совместной работы СПИН с сетью переменного тока

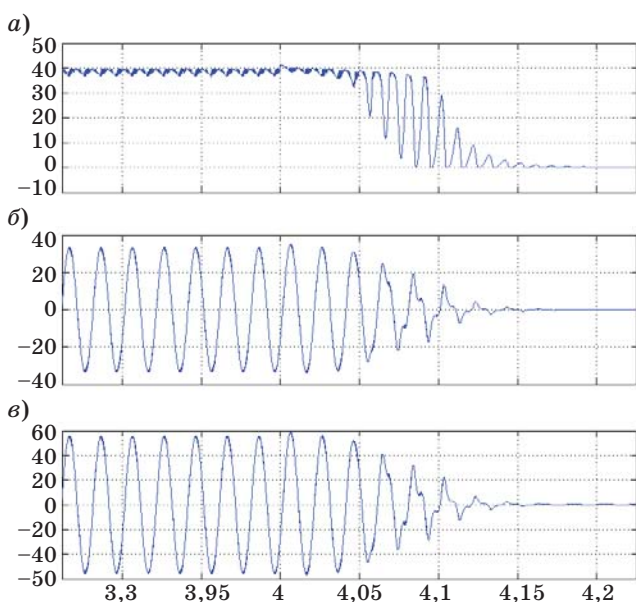


Рис. 8. Совместная работа СПИН с сетью переменного тока (отключение сети при $t = 4$): а — изменение напряжения на накопителе; б — изменение напряжения на нагрузке; в — изменение тока на нагрузке

В случае применения СПИН для стабилизации напряжения в цепи переменного тока необходимо дополнить систему однофазным инвертором напряжения. Модель такой системы представлена на рис. 7, а результаты ее работы — на рис. 8, а–в.

Результаты исследований работы отдельных сверхпроводниковых электромеханических и электроэнергетических устройств в статических и динамических режимах [3, 6–9] были использованы при построении математических моделей, необходимых для решения задачи синтеза параметров закона управления СВУ обобщенным методом Галеркина.

Метод синтеза параметров регулятора

Если предположить, что импульсный элемент генерирует решетчатую функцию с периодом T , образованную из входного непрерывного сигнала, то сигнал на выходе импульсного элемента определяется выражением вида [10, 11]

$$x^*(t) = x(t)|_{t=nT},$$

где T — период квантования.

Можно представить, что идеальный импульсный элемент генерирует с периодом T последовательность бесконечно коротких импульсов типа δ -функции, площадь которых пропорциональна непрерывному сигналу на входе импульсного элемента в моменты времени $t = nT$ [10, 11]

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT)\delta(t-nT). \quad (2)$$

Здесь

$$x(nT) = \int_0^{\infty} x(t)\delta(t-nT)dt$$

— величина n -го дискретного значения; $\delta(t-nT)$ — задержанная импульсная функция, существующая при $t = nT$; T — период прерывания, интервал времени между соседними импульсами.

Таким образом, импульсный элемент эквивалентен модулятору, в котором в качестве модулирующего сигнала используется входной сигнал $x(t)$, а в качестве несущего — последовательность единичных импульсов

$$\sum_{n=0}^{\infty} \delta(t-nT).$$

В этом случае система автоматического управления, содержащая модулятор и нелинейный

элемент, в общем виде описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} & Q(c_k, D)x(t) + Q^*(c_k, D)x^*(t) + \\ & + R(c_k, D)y(t) + R^*(c_k, D)y^*(t) = \\ & = S(c_k, D)f(t) + S^*(c_k, D)f^*(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $x(t)$, $x^*(t)$ — исследуемая координата на входе и выходе модулятора соответственно, относительно которой записано уравнение движения синтезируемой САУ; $f(t)$, $f^*(t)$ — внешнее входное воздействие на входе и выходе модулятора соответственно; $y(t) = F[x(t)]$, $y^*(t) = F[x^*(t)]$ — нелинейные функции;

$$\begin{aligned} Q(c_k, D) &= \sum_{i=0}^n a_i(c_k)D^i; \quad Q^*(c_k, D) = \sum_{i=0}^{n^*} a_i^*(c_k)D^i; \\ R(c_k, D) &= \sum_{i=0}^u b_i(c_k)D^i; \quad R^*(c_k, D) = \sum_{i=0}^{u^*} b_i^*(c_k)D^i; \\ S(c_k, D) &= \sum_{i=0}^v e_i(c_k)D^i; \quad S^*(c_k, D) = \sum_{i=0}^{v^*} e_i^*(c_k)D^i \end{aligned}$$

— полиномы оператора обобщенного дифференцирования D с вещественными постоянными коэффициентами степеней n , n^* , u , u^* , v , v^* соответственно.

Очевидно, что при описании динамики импульсных САУ с одним нелинейным элементом в частных случаях часть слагаемых уравнения (3) может отсутствовать. Также необходимо отметить, что запись уравнения движения относительно координаты входа нелинейного звена дает несомненные преимущества при реализации метода синтеза систем на основе обобщенного метода Галеркина. Это связано с упрощением процедуры определения соотношений вида «вход-выход» интегралов Галеркина.

В уравнении (3) применяется универсальная координата времени. Это дает возможность использовать дискретно-непрерывные модели систем, определяющих их описание на каждом из интервалов дискретности, и позволяет без перехода к разностным уравнениям, которые требуют получения аналитических решений нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений, решать задачу синтеза обобщенным методом Галеркина с единых математических позиций для САУ широкого класса [10, 11].

Характерным для электроэнергетических систем и комплексов является экспоненциальный характер динамических процессов, поэтому в качестве желаемого программного движения [4] принимается процесс вида

$$x^0(t) = (x_y + H^* e^{-at})\mathbf{1}(t), \quad (4)$$

где x_y — значение желаемого процесса $x^0(t)$ при $t = \infty$; $H^* = x_0 - x_y$; x_0 — начальное значение желаемого процесса в момент времени $t = +0$.

Желаемое программное движение на выходе импульсного элемента будет иметь вид

$$x^{0*}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (x_y + H^* e^{-anT})\delta(t - nT). \quad (5)$$

Поставим желаемое программное движение (4) в уравнение движения системы (3) и образуем невязку

$$\begin{aligned} \psi(c_k, t) &= Q(c_k, D)x^0(t) + Q^*(c_k, D)x^{0*}(t) + \\ & + R(c_k, D)F[x^0(t)] + R^*(c_k, D)F[x^{0*}(t)] - \\ & - S(c_k, D)f(t) - S^*(c_k, D)f^*(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Если предположить, что система с синтезированными параметрами заведомо устойчива, то значения искоемых параметров определяются из условия ортогональности невязки (6) координатным функциям $\varphi_q(t)$, выбранным в виде ряда вещественных экспонент [10–13]

$$\int_0^{\infty} \psi(c_k, t)\varphi_q(t)dt = 0, \quad k, q = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

что приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} Q(c_k, D)x^0(t)\varphi_q(t)dt + \int_0^{\infty} Q^*(c_k, D)x^{0*}(t)\varphi_q(t)dt + \\ & + \int_0^{\infty} R(c_k, D)F[x^0(t)]\varphi_q(t)dt + \\ & + \int_0^{\infty} R^*(c_k, D)F[x^{0*}(t)]\varphi_q(t)dt - \\ & - \int_0^{\infty} S(c_k, D)f(t)\varphi_q(t)dt - \\ & - \int_0^{\infty} S^*(c_k, D)f^*(t)\varphi_q(t)dt = 0, \\ & k, q = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (8)$$

Решая систему из m алгебраических уравнений (8), определяем значения варьируемых параметров оператора управления. Поскольку задача синтеза решается при ограничениях на значения искоемых параметров, наложенных, исходя из возможности их технической реализации, ограничениях на устойчивость и грубость САУ с синтезированными параметрами, а также в силу того, что, как правило, имеет место нелинейная зависимость между варьируемыми

параметрами, то строго равенство (7) выполняться не будет [10–13]. Поэтому задача синтеза параметров обобщенным методом Галеркина в вычислительном плане представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений (8) и имеющей вид

$$J = \sum_{q=1}^m \left\{ \int_0^{\infty} \psi(c_k, t) \varphi_q(t) dt \right\}^2, \quad \min_{c_k} J \rightarrow 0, \quad (9)$$

оптимум которой определяется при ограничениях, отмеченных выше, путем использования известных методов поиска экстремума функционала [12, 13].

С учетом уравнения (6) целевая функция принимает вид

$$J = \sum_{q=1}^m \left\{ \sum_{i=0}^n a_i(c_k) A_{qi} + \sum_{i=0}^{n^*} a_i^*(c_k) A_{qi}^* + \sum_{i=0}^u b_i(c_k) B_{qi} + \sum_{i=0}^{u^*} b_i^*(c_k) B_{qi}^* - \sum_{i=0}^v e_i(c_k) C_{qi} - \sum_{i=0}^{v^*} e_i^*(c_k) C_{qi}^* \right\}^2, \quad q = 1, 2, \dots, m,$$

где

$$\begin{aligned} A_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{x^0(t)\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, n; \\ A_{qi}^* &= \int_0^{\infty} D^i \{x^{0*}(t)\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, n^*; \\ B_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{F[x^0(t)]\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, u; \\ B_{qi}^* &= \int_0^{\infty} D^i \{F[x^{0*}(t)]\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, u^*; \\ C_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{f(t)\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, v; \\ C_{qi}^* &= \int_0^{\infty} D^i \{f^*(t)\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 0, 1, \dots, v^*. \end{aligned}$$

Интегралы Галеркина A_{qi} , B_{qi} , C_{qi} были определены ранее [4] для программного движения (4) на входе аппроксимированного аналитически нелинейного элемента и внешнего скачкообразного входного воздействия.

Интегральное соотношение, определяющее C_{qi}^* , для внешнего воздействия вида $f(t) = H1(t)$, которое на выходе импульсного элемента [в соответствии с (2)] будет

$$f^*(t) = H1^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} H\delta(t - nT), \quad (10)$$

в соответствии с [10, 11] имеет вид

$$C_{qi}^* = \int_0^{\infty} D^i \left\{ H \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT) \right\} e^{-\rho_q t} dt = C_{qi}^* \rho_q^i, \quad i = 1, 2, \dots, v^*, \quad (11)$$

где $C_q^* = \frac{H}{1 - e^{-\rho_q T}}$, $q = 1, 2, \dots, m$.

Для процесса вида (5) интеграл Галеркина A_{qi}^* будет следующим:

$$A_{qi}^* = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} [x_y + H^* e^{-\alpha n T}] \delta(t - nT) \right\} e^{-\rho_q t} dt = A_{qi}^* \rho_q^i, \quad i = 1, 2, \dots, n^*, \quad (12)$$

где

$$A_q^* = \frac{x_y}{1 - e^{-\rho_q T}} + \frac{H^*}{1 - e^{-(\alpha + \rho_q) T}}, \quad q = 1, 2, \dots, m.$$

Таким образом, для распространения метода синтеза на импульсные САУ с аналитической аппроксимацией линейных характеристик необходимо определить интегралы B_{qi}^* .

Определение интегралов Галеркина B_{qi}^*

Рассмотрим вычисление интегралов B_{qi}^* для нелинейной функции вида (1) и процесса

$$x^0(t) = x_0 e^{-\alpha t} 1(t),$$

который на выходе импульсного модулятора приобретает вид

$$x^{0*}(t) = x_0 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\alpha n T} \delta(t - nT). \quad (13)$$

С учетом (13) процесс на выходе нелинейного элемента (1) будет

$$\begin{aligned} F \left[x_0 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\alpha n T} \delta(t - nT) \right] &= \\ &= \sum_{g=0}^l a_g x_0^g \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-\alpha n T})^g \delta(t - nT). \end{aligned}$$

В результате требуется определить интеграл вида

$$B_{qi}^* = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l a_g x_0^g \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-\alpha n T})^g \delta(t - nT) \right\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 1, 2, \dots, n^*.$$

Для вычисления данного интеграла в соответствии с методикой, подробно изложенной в работах [10, 11], используются соотношения, опреде-

ляющие обобщенную производную i -го порядка от функции $y^*(t) = F[x^*(t)]$:

$$D^i \left\{ F[x^{0*}(t)] \right\} = \sum_{n=0}^{\infty} F(nT) \delta^{(i)}(t - nT),$$

где $\delta^{(i)}(t - nT)$ — производные δ -функции Дирака порядка i ; $F(nT)$ — величина n -го дискретного значения функции $F[x^*(t)]$, являющейся выражением нелинейной функции в момент времени $t = nT$:

$$F(nT) = \int_0^{\infty} F(t) \delta(t - nT) dt,$$

а также соотношениями, определяющими правила действия с функциональными рядами

$$\int_a^b \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} f_k(x) \right\} dx = \sum_{k=0}^{\infty} \int_a^b f_k(x) dx, \quad [a \leq x \leq b];$$

$$D \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} f_k(x) dx \right\} = \sum_{k=0}^{\infty} D \{ f_k(x) dx \}, \quad k = 0, 1, \dots;$$

$$\int_0^{\infty} f(t) \delta^{(k)}(t - \tau) dt = (-1)^k f^{(k)}(\tau), \quad k = 0, 1, \dots,$$

последнее из которых описывает фильтрующее свойство δ -функции, существующей в момент времени $t = \tau$.

В результате получаем

$$B_{qi}^* = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l a_g x_0^g \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-anT})^g \delta(t - nT) \right\} e^{-\rho_q t} dt = B_{q0}^* \rho_q^i, \quad i = 1, 2, \dots, n^*,$$

$$\text{где } B_{q0}^* = \sum_{g=0}^l \frac{a_g x_0^g}{1 - e^{-(g\alpha + \rho_q)T}}.$$

Если на входе нелинейного элемента будет импульсный процесс вида

$$x^{0*}(t) = x_y \sum_{n=0}^{\infty} (1 - e^{-anT}) \delta(t - nT),$$

то требуется определить интеграл

$$B_{qi}^* = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l a_g x_y^g \sum_{n=0}^{\infty} (1 - e^{-anT})^g \delta(t - nT) \right\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = 1, 2, \dots, n^*.$$

Для разных значений g получаем интегральные соотношения, приведенные в таблице, из которой следует, что распределение коэффициентов числителей слагаемых интегральных соотношений соответствует треугольнику Паскаля. Это дает возможность обобщить полученные результаты на общий случай $g = l$. В результате получаем

$$B_{qi}^* = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l a_g x_y^g \sum_{n=0}^{\infty} (1 - e^{-anT})^g \delta(t - nT) \right\} \times e^{-\rho_q t} dt = B_{q0}^* \rho_q^i, \quad i = 1, 2, \dots, n^*,$$

где

$$B_{q0}^* = \sum_{g=0}^l a_g x_y^g \sum_{k=0}^g \frac{(-1)^k C_g^k}{1 - e^{-(k\alpha + \rho_q)T}}, \quad C_g^k = \frac{g!}{k!(g-k)!}$$

— число возможных сочетаний из g по k .

■ Аналитические соотношения, определяющие интегралы B_{q0}^*

g	B_{q0}^*
0	$a_0 \left[\frac{1}{1 - e^{-\rho_q T}} \right]$
1	$a_1 x_y \left[\frac{1}{1 - e^{-\rho_q T}} - \frac{1}{1 - e^{-(\alpha + \rho_q)T}} \right]$
2	$a_2 x_y^2 \left[\frac{1}{1 - e^{-\rho_q T}} - \frac{2}{1 - e^{-(\alpha + \rho_q)T}} + \frac{1}{1 - e^{-(2\alpha + \rho_q)T}} \right]$
3	$a_3 x_y^3 \left[\frac{1}{1 - e^{-\rho_q T}} - \frac{3}{1 - e^{-(\alpha + \rho_q)T}} + \frac{3}{1 - e^{-(2\alpha + \rho_q)T}} - \frac{1}{1 - e^{-(3\alpha + \rho_q)T}} \right]$
4	$a_4 x_y^4 \left[\frac{1}{1 - e^{-\rho_q T}} - \frac{4}{1 - e^{-(\alpha + \rho_q)T}} + \frac{6}{1 - e^{-(2\alpha + \rho_q)T}} - \frac{4}{1 - e^{-(3\alpha + \rho_q)T}} + \frac{1}{1 - e^{-(4\alpha + \rho_q)T}} \right]$
5	$a_5 x_y^5 \left[\frac{1}{1 - e^{-\rho_q T}} - \frac{5}{1 - e^{-(\alpha + \rho_q)T}} + \frac{10}{1 - e^{-(2\alpha + \rho_q)T}} - \frac{10}{1 - e^{-(3\alpha + \rho_q)T}} + \frac{5}{1 - e^{-(4\alpha + \rho_q)T}} - \frac{1}{1 - e^{-(5\alpha + \rho_q)T}} \right]$

Таким образом, полученные рекуррентные соотношения дают возможность полностью алгебраизировать решение задачи синтеза параметров регуляторов САУ, содержащих идеальный амплитудно-импульсный модулятор и аналитически аппроксимированные нелинейные характеристики, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями произвольно высокого порядка. В соответствии с работами [10, 11] полученные результаты легко распространяются на случай систем с идеальным амплитудно-импульсным модулятором и экстраполятором нулевого порядка путем умножения полученных интегральных соотношений A_{qi}^* , B_{qi}^* , C_{qi}^* на множитель $\frac{1 - e^{-\rho_q T}}{\rho_q}$.

Литература

1. Чубраева Л. И. Обзор развития сверхпроводниковых электрических машин // Формирование современного информационного общества — проблемы, перспективы, инновационные подходы. Круглый стол «Инновационные технологии в электромеханике, энергетике и системах управления» (к 120-летию академика М. П. Костенко): сб. докл. Междунар. форума, Санкт-Петербург, 6–11 июня 2010 г. СПб.: ГУАП, 2010. С. 9–26.
2. Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. Роль информационных технологий при создании новой техники // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 10–15.
3. Chubraeva L. I., Shyshlakov V. F., Turubanov M. A., Tymofeyev S. S., Volkov D. A. Development of a Model Wind and Solar Power Installation Comprising High-Temperature Superconductors // Energy Science and Technology. 2013. Vol. 6. N 2. P. 64–70. DOI:10.3968/j.est.1923847920130602.2374
4. Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. Синтез электромеханических систем автоматического управления при аналитической аппроксимации характеристик нелинейных элементов // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2. С. 2–8.
5. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для втузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988. — 239 с.
6. Андреев Е. А., Волков Д. А., Орлов А. Р., Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. Автономная электроэнергетическая установка с использованием высокотемпературных сверхпроводников // Сверхпрово-

Заключение

Разработанные теоретические положения, основывающиеся на обобщенном методе Галеркина, позволили распространить данный математический аппарат на импульсные САУ при аналитической аппроксимации нелинейных статических характеристик. С использованием результатов экспериментальных исследований сверхпроводниковых элементов и устройств обобщенным методом Галеркина решена задача синтеза алгоритма управления комбинированной солнечной и ветроэнергетической установкой со сверхпроводниковым синхронным генератором и сверхпроводниковыми силовыми регуляторами тока.

димность: исследования и разработки. 2009. № 14. С. 7–12.

7. Мартынов А. А., Орлов А. Р., Тимофеев С. С., Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. Совместная работа ВТСП устройств автономной электроэнергетической установки // Сверхпроводимость: исследования и разработки. 2009. № 14. С. 13–22.
8. Физическое моделирование потерь на трение в режиме холостого хода синхронного ВТСП-двигателя / Е. Н. Андреев, Д. А. Волков, А. Р. Орлов, С. С. Тимофеев, М. А. Турубанов, Л. И. Чубраева, В. Ф. Шишлаков // Информационно-управляющие системы. 2011. № 3. С. 34–38.
9. Физическое моделирование процессов в ВТСП-проводах и изделиях / Е. Н. Андреев, Д. А. Волков, А. Р. Орлов, С. С. Тимофеев, М. А. Турубанов, Л. И. Чубраева, В. Ф. Шишлаков // Информационно-управляющие системы. 2011. № 4. С. 47–52.
10. Шишлаков В. Ф. Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: монография / СПбГУАП. — СПб., 1999. — 268 с.
11. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / под ред. В. Ф. Шишлакова; СПбГУАП. — СПб., 2003. — 358 с.
12. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / под ред. А. А. Воронова и И. А. Огурка. — М.: Наука, 1984. — 340 с.
13. Алгоритмы динамического синтеза нелинейных автоматических систем / под ред. А. А. Воронова и И. А. Огурка. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. — 334 с.

UDK 681.51

Impulse Control System for Combined Solar and Wind Installation with Superconductor EquipmentTurubanov M. A.^a, Head of the Computational Laboratory, kaf_32@aanet.ruShishlakov V. F.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, kaf_32@aanet.ruShyshlakov A. V.^b, Programmer Engineer, shyshlakov@yahoo.com^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bGroup of companies RSC «Aurora», 15, Karbyshev St., 194021, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: There has been considered a PLC-based control system of electric power facility which includes superconductor equipment. **Method:** An inverted direct variation of the generalized Galerkin method has been used for control system design. **Results:** There have been obtained analytical “input/output” recurrence relations defining Galerkin integrals for analytically approximated nonlinear characteristics in case of an impulse exponential process at their inputs which application allows to fully algebraize a solution of the problem of continuous automatic control systems synthesis using the given type of approximation of nonlinear characteristics. **Practical relevance:** The developed theoretical statements based on the generalized Galerkin method have allowed using that mathematical model for automatic impulse control systems at analytical approximation of nonlinear static characteristics. Practical relevance of the research results is creation of the system of automatic control of a combined power facility with superconductive equipment.

Keywords – Superconductive Equipment, Electric Power Facility, Analytical Approximation, Impulse Nonlinear Systems, Generalized Galerkin Method.

References

1. Chubraeva L. I. A Review of the Development of Superconducting Electrical Machines. *Sbornik докладov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma “Formirovanie sovremennogo informatsionnogo obshchestva — problemy, perspektivy, innovatsionnye podkhody”*. Kruglyi stol “Innovatsionnye tekhnologii v elektromekhanike, energetike i sistemakh upravleniia” (k 120-letiiu akademika M. P. Kostenko) [Proc. Int. Forum “The Formation of the Information Modern Society — Problems, Perspectives, Innovation Approaches”. Round work table “Innovative Technologies in Electromechanics, Energetic and Control Systems”]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2010. P. 9–26 (In Russian).
2. Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. The Role of Information Technologies at Developing New Devices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2012, no. 4, pp. 10–15 (In Russian).
3. Chubraeva L. I., Shyshlakov V. F., Turubanov M. A., Tymofeyev S. S., Volkov D. A. Development of a Model Wind and Solar Power Installation Comprising High-Temperature Superconductors. *Energy Science and Technology*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 64–70. DOI:10.3968/j.est.1923847920130602.2374
4. Chubraeva L. I., Shishlakov A. V. Synthesis of Electromechanical Automatic Control Systems Using an Analytical Approximation of Nonlinear Component Characteristics. *Informacionno-upravljajushhie sistemy*, 2014, no. 2, pp. 2–8 (In Russian).
5. L'vovskij E. N. *Statisticheskie metody postroeniia empiricheskikh formul* [The Statistics Methods for Constructing Empirical Formulas]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 239 p. (In Russian).
6. Andreev E. A., Volkov D. A., Orlov A. R., Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. Self-Contained Electricity Generating Unit with High-Temperature Superconductors. *Sverkhprovodimost': issledovaniia i razrabotki*, 2009, no. 14, pp. 7–12 (In Russian).
7. Martynov A. A., Orlov A. R., Timofeev S. S., Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. Team Work HTS Devices Independent Power Plant. *Sverkhprovodimost': issledovaniia i razrabotki*, 2009, no. 14, pp. 13–22 (In Russian).
8. Andreev E. N., Volkov D. A., Orlov A. R., Timofeev S. S., Turubanov M. A., Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. Physical Simulation of Friction Loss in Idling Synchronous Generators. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2011, no. 3, pp. 34–38 (In Russian).
9. Andreev E. N., Volkov D. A., Orlov A. R., Timofeev S. S., Turubanov M. A., Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. Physical Simulation of the Processes in HTSC Wires. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2011, no. 4, pp. 47–52 (In Russian).
10. Shishlakov V. F. *Sintez nelineinykh SAU s razlichnymi vidami moduljatsii* [Synthesis of Nonlinear Systems with Different Types of Modulation]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 1999. 268 p. (In Russian).
11. Nikitin A. V., Shishlakov V. F. *Parametricheskii sintez nelineinykh sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Synthesis of the Parameters of Nonlinear Automatic Control Systems]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2003. 358 p. (In Russian).
12. *Analiz i optimal'nyi sintez na EVM sistem upravleniia* [Computer Analysis and Optimal Synthesis Automatic Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 340 p. (In Russian).
13. *Algoritmy dinamicheskogo sinteza nelineinykh avtomaticheskikh sistem* [Algorithms of Dynamic Synthesis of Nonlinear Automatic Control Systems]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 334 p. (In Russian).