Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года ISSN 2072-2672 Индекс 18079 Вып. 6 /2020

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново) (главный редактор)
Е.Р. Пантелеев, д-р техн. наук (Иваново) (зам. главного редактора)
Е.Н. Бушуев, д-р техн. наук (Иваново)
А.Р. Гайдук, д-р техн. наук (Таганрог)
В.П. Жуков, д-р техн. наук (Иваново)
Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Клюнина (Иваново)
А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)
В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)
В.Е. Мизонов, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

D. Antić, профессор (Сербия)
H. Berthiaux, профессор (Франция)
H. Otwinowski, доктор (Польша)
K. Tannous, профессор (Бразилия)
J.-C. Vannier, профессор (Франция)

Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, В.А. Шуин, А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, В.Е. Мизонов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ **С.В. Клюнина**
Технический редактор **Н.В. Королева**
Редактор **С.М. Коткова**

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

В.В. Бухмиров, А.В. Садчиков, А.А. Садчиков, Е.Н. Темлянцева, Е.Н. Бушуев. Разработка горелочного устройства для эффективного сжигания биогаза.....**5**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В.П. Голов, А.В. Калуцков, Д.Н. Кормилицын, О.С. Суханова. Критерий апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ.....**14**

С.Г. Обухов, Г.Н. Климова, А. Ибрагим. Методика оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии.....**25**

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин. Синтез робастных систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами и наблюдателями состояния.....**39**

А.А. Николаев, И.Г. Гилемов. Разработка и исследование усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с изменяемыми таблицами углов переключения....**48**

А.В. Аверченков, И.Е. Колошкина, С.А. Шептунов. Автоматизация нормирования операций производства изделий на оборудовании с ЧПУ.....**57**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов, А.Н. Беляков, Н.С. Шпейнова. Разработка вероятностно-статистической модели расширения и аксиальной структуры псевдоожиженного слоя частиц антрацита.....**68**

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим группам специальностей: 05.09.00 – Электротехника; 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.14.00 – Энергетика.

Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».

Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).

© ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Ivanovo State Power Engineering University

Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001 ISSN 2072-2672 Issue 6 /2020

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

EDITORIAL BOARD:

S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo) (Chief Editor)
E.R. Panteleev, Doctor of Engineering (Ivanovo) (Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.E. Mizonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

D. Antir, Professor (Serbia)
H. Berthiaux, Professor (France)
H. Otwinowski, Doctor (Poland)
K. Tannous, Professor (Brazil)
J.-C. Vannier, Professor (France)

The issue is prepared by:

Responsible people for the issue: E.N. Bushuyev, V.A. Shuin, A.I. Tikhonov, A.R. Kolganov, V.E. Mizonov, S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific Literature Publishing Office **S.V. Klyunina**
Technical Editor **N.V. Koroleva**
Editor **S.M. Kotkova**

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

V.V. Bukhmirov, A.V. Sadchikov, A.A. Sadchikov, E.N. Temlyantseva, E.N. Bushuev. Burner development for efficient combustion of biogas.....**5**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

V.P. Golov, A.V. Kalutskov, D.N. Kormilitsyn, O.S. Sukhanova. Aperiodic steady-state stability criterion of electric power system with controlled series compensation on 200 kV line.....**14**

S.G. Obukhov, G.N. Klimova, A. Ibrahim. Methodology of optimum unit commitment of energy systems with renewable energy sources.....**25**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

A.A. Anisimov, S.V. Tararykin. Synthesizing robust control systems for mechatronic objects with digital state controllers and observers.....**39**

A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov. Development and research of improved PWM algorithm of an active rectifier with variable switching angle tables.....**48**

A.V. Averchenkov, I.E. Koloshkina, S.A. Sheptunov. Automation of introduction of norms of working operations on CNC equipment.....**57**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

A.V. Mitrofanov, V.E. Mizonov, A.N. Belyakov, N.S. Shpeynova. Development of stochastic model of particulate coal fluidized bed expansion and axial structure.....**68**

The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialities: 05.09.00 – Electrical Engineering; 05.13.00 – Informatics, Computer Science and Management; 05.14.00 – Power Engineering.

Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.

The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.

©Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education
«Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 665.765:621.771.014.2

Вячеслав Викторович Бухмиров
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Алексей Викторович Садчиков
ФГБОУВО «Оренбургский государственный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики, Россия Оренбург.

Алексей Алексеевич Садчиков
ФГБОУВО «Оренбургский государственный университет», студент, Россия, Оренбург, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Елена Николаевна Темлянцева
ФГБОУВО «Сибирский государственный индустриальный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: kafedra-TEE@yandex.ru

Евгений Николаевич Бушуев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Разработка горелочного устройства для эффективного сжигания биогаза

Авторское резюме

Состояние вопроса. Потребность в энергоресурсах в современном металлургическом производстве практически полностью покрывается газообразным топливом. Альтернативным и более дешевым видом топлива является биогаз, получаемый в процессе переработки органических отходов. Опыт его использования показал, что в большинстве современных горелочных устройств происходит снижение КПД и наблюдается ограничение диапазона регулирования нагрузки. Для применения биогаза в промышленных условиях необходима разработка горелочных устройств и способов его сжигания, обеспечивающих большую полноту сгорания, а также более высокую эффективность преобразования энергии.
Материалы и методы. Использованы результаты газового анализа биогаза, полученного в процессе анаэробного разложения органических отходов в реакторах биоэнергетической станции. Для оценки показателей энергетической эффективности газовой горелки использованы методы математической статистики с применением регрессионного анализа экспериментальных данных.
Результаты. Экспериментально доказана возможность использования биогаза и свалочного газа в процессах обжига, доменной плавки, производства проката и стали, а также термической обработки металла. Описаны свойства и состав биогаза на выходе из реактора метаногенеза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро». Предложена новая конструкция газовой горелки, в которой благодаря эф-

© Бухмиров В.В., Садчиков А.В., Садчиков А.А., Темлянцева Е.Н., Бушуев Е.Н., 2020
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 6, с. 5–13.

фекту вращения перфорированных трубопроводов газоподводящих каналов значительно (до 32 %) повышается эффективность смесеобразования и полнота сгорания потока метаносодержащей газовой смеси. На основе результатов выполненного промышленного эксперимента определены оптимальные значения скорости подачи газовоздушной смеси, температуры подаваемого воздуха, объемной доли метана в целях получения наибольшей ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа.
Выводы. Применение предложенной конструкции газовой горелки позволит энергетически эффективно сжигать биогаз в металлургических печах, печах обжига и сушилках, а также в любых паровых и водогрейных котлах.

Ключевые слова: биогаз, биоэнергетическая станция, газовоздушная смесь, горелочное устройство, сжигание газовых смесей, энергосбережение

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Alexey Viktorovich Sadchikov
Orenburg State University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associative Professor of Electric and Heat Power Engineering Department, Russia, Orenburg.

Alexey Alekseevich Sadchikov
Orenburg State University, student, Russia, Orenburg, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Elena Nikolaevna Temlyantseva
Siberian State Industrial University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associative Professor of Heat Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: kafedra-TEE@yandex.ru

Evgeny Nikolaevich Bushuev
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of technical Sciences, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Burner development for efficient combustion of biogas

Abstract

Background. Now in metallurgical production energy resources demand is almost completely satisfied by gaseous fuel. Biogas obtained during organic waste processing is considered as an alternative and cheaper type of fuel. The experience of biogas application has shown that in most modern burners decrease of efficiency and limitation of the range of load regulation is observed. To apply biogas in an industrial environment, it is necessary to develop burners and the methods of its combustion, which provide a high combustion efficiency, as well as a higher energy conversion efficiency.
Materials and methods. The authors have used the results of gas analysis of biogas obtained in the process of anaerobic decomposition process of organic waste in the reactors of a bioenergy plant. Methods of mathematical statistics with the use of regression analysis of experimental data were used to assess the indicators of the energy efficiency of the gas burner.
Results. The possibility of using biogas and landfill gas in the process of roasting, blast-furnace smelting, production of rolled products and steel, as well as heat treatment of metal has been experimentally proven.
The properties and composition of biogas at the outlet of the methanogenesis reactor of the bioenergy plant “EcoVoltAgro” are described. A new design of a gas burner is proposed. In this model the efficiency of mixture formation and the completeness of combustion of the flow of a methane-containing gas mixture are significantly increased (up to 32 %) due to the effect of rotation of the perforated pipelines of the gas inlet pipe. On the basis of the results of the full-scale experiment, the optimal values of the gas-air mixture supply rate, the temperature of the supplied air, the volume fraction of methane were determined in order to obtain the largest width of the zone of deviations of the permissible concentrations of carbon dioxide.
Conclusions. The use of the designed gas burner provides energy-efficient combustion of biogas in metallurgical furnaces, kilns, and dryers, as well as in any steam and hot water boilers.

Key words: biogas, bioenergy plant, gas-air mixture, burner, combustion of gas mixtures, energy saving

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.005-013

Введение. История такой отрасли российской промышленности, как черная металлургия, тесно связана с историей развития топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. Последние два десятилетия отмечены устойчивым ростом доли газообразного топлива в потреблении энергоресурсов на основные нужды технологических процессов.

В настоящее время тенденция роста доли потребления природного газа предприятиями черной металлургии обусловлена уменьшением объемов поставок коксующихся углей, общим снижением производительности коксовых батарей и доменных печей, а также значительным уменьшением потребления доменного и коксового газов в общем объеме энергоресурсов, потребляемых в процессах и технологиях черной металлургии.

Если не учитывать расход металлургического кокса в технологических целях, то вся потребность в энергоресурсах на современном металлургическом производстве практически полностью покрывается газообразным топливом. В редких случаях в качестве резервного топлива используется мазут, а в районах, удаленных от систем распределения природного газа, для покрытия дефицита все чаще используется сжиженный газ. Среднестатистическая структура топливного баланса современного металлургического производства включает в себя 85 % газообразного топлива, 10 % твердого и 5 % жидкого топлива[2].

С другой стороны, конкурентоспособность продукции черной металлургии в современных рыночных условиях зависит в первую очередь от ее энергоемкости, при этом неуклонный рост цен на природный газ негативно сказывается на всех аспектах металлургического производства.

В связи с этим использование альтернативных, более дешевых видов газообразного топлива, а также повышение качества процесса сжигания газообразного топлива в технологических процессах черной металлургии является актуальным научным направлением.

Рост потребляемого газообразного топлива спровоцировал значительное увеличение парка эксплуатируемых газогорелочных устройств, в настоящее время в черной металлургии используется свыше 52000. Из них наибольшая доля (свыше 46 %) приходится на метизное производство, около 40 % используется в производстве проката и стали. При этом годовой объем производимых в России промышленных газовых горелок не превышает 10000, тогда как фактическая потребность в черной металлургии возросла до 11000–14000 в год.

Так, в 2012 году доля черной металлургии в ВВП страны составляла около 1,4 %, в промышленном производстве – около 8 %, в экспорте – 6 %. Как потребитель продукции и услуг субъектов естественных монополий, черная металлургия использует 5,3 % электроэнергии, более 8 % природного газа от общего внутреннего потребления в России[3]. В настоящее время доля потребления газообразного топлива значительно возросла. Например, по сведениям портала металлургической базы России[4], в 2018 году более 82 % эксплуатируемых в черной металлургии газовых горелок использовали природный газ как основное топливо. Действительно, газообразное топливо, природный газ, продукты конверсии природного газа (в особенности водород) являются эффективным сырьем, используемым в процессах активного восстановления железа из окатышей[5].

В качестве альтернативного варианта газогорелочных устройств ниже рассматриваются горелки, используемые для сжигания метаносодержащих газовых смесей с широким диапазоном изменения объемной доли метана, таких как биогаз, получаемый в процессе переработки органических отходов [1, 2].

[2] Использование газов в черной металлургии: Газоснабжение металлургического завода. – Металлургический портал MetalSpace. – Режим доступа: http://metallicheckiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie_gazov/gazosnabzenie_metallyrgicheskogo_zavoda1

[3] Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года».

[4] Уральская, Центральная и Сибирская Металлургические базы России. Режим доступа: http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/metallurgicheskaya-baza.html

[5] Производство железа: особенности выплавки и добычи сырья. Режим доступа: http://stroyres.net/metallicheskie/vidyi/chyornyie/zhelezo/proizvodstvo-vyiplavki.html

Эффективность работы газогорелочных устройств, сжигающих биогаз и свалочный газ, зависит, прежде всего, от состава газа и его энергетических характеристик, а также от организации процесса сжигания биогаза и конструкции горелочного устройства.

Проблема использования биогаза в технологических процессах черной металлургии, связанная с их компонентным составом, может быть решена благодаря совместной реализации следующих направлений:

– повышение эффективности систем очистки и разделения метаносодержащих газовых смесей [3–16];

– повышение эффективности устройств и способов сжигания биогаза [17–19].

Методы исследования. Биогаз, получаемый в процессе анаэробного разложения органических отходов, представляет собой газовую смесь с высоким содержанием метана. Теплотворная способность биогаза определяется в основном величиной объемной доли CH_4. На выходе из реактора биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» (ООО «КомплеСУ», г. Оренбург) в составе биогаза присутствуют балластные примеси, наличие которых может оказывать негативное влияние как на сам процесс сжигания, так и на работу энергосилового оборудования [1]. Присутствие сероводорода даже в небольших количествах может привести к существенному сокращению срока службы трубопроводов, компрессора, запорно-регулирующей арматуры, газопоршневого генератора, котла. Сероводород относится к агрессивным примесям, так как при взаимодействии с водой способен образовывать серную кислоту. По этой причине непосредственно после реактора биогаз очищается от влаги, сероводорода и меркаптановой серы с помощью оксида железа и специального фильтра-осушителя. Часть серы также кристаллизуется в процессе сбраживания в реакторе и камере гомогенизации за счет добавления в загрузочное сырье хлорида железа в небольших количествах (не более 500 грамм на 2 тонны загружаемого субстрата 1 раз в 10 дней). После проведения указанных мероприятий биогаз имеет в составе два основных макрокомпонента – метан и углекислый газ, объемное соотношение которых колеблется в зависимости от времени года и состава загрузочного сырья. Азот присутствует в ничтожно малом количестве.

Состав биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» изменяется в течение года в зависимости от технологического графика рециклинга отходов, природных климатических условий, а также от термобарических условий режимов ферментации и ряда факторов, имеющих ярко выраженный вероятностный характер изменения. В настоящее время ООО «КомплеСУ» перерабатывает и утилизирует 47 видов различных отходов, в том числе с содержанием органики. В процессах анаэробной переработки используются некачественные продукты питания, отходы убойного производства, включая продукты переработки технических фабрикатов убойного производства, навоз крупного рогатого скота, санкционные продукты, птичий помет.

Каждому виду отходов соответствует определенный график поступления, в связи с чем периодически происходит изменение компонентного состава загружаемого субстрата (инфлюента). При этом периодически изменяется компонентный состав получаемого биогаза. Происходят изменения соотношения объемных долей основных макрокомпонентов биогаза – метана A_{CH4} и углекислого газа A_{CO2} [16].

Пример динамики изменения среднесуточного значения объемной доли метана биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» в течение сентября 2018 года после отделения сероводорода и влаги представлен на рис. 1.

Анализ этих данных показывает, что объемная доля метана в биогазе в течение года изменяется в пределах от 61,8 до 86,4 %, среднегодовое значение A_{CH4} составляет 72,17 % от общего объема. Это значение отвечает требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 5542-2014 «Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения» и вполне достаточно для дальнейшего использования биогаза в качестве основного топлива в процессах обжига, доменной плавки, производства проката и стали, термической обработки металла. С другой стороны, наличие углекислого газа в составе биогаза вызывает осложнение процесса сжигания, при этом возникают проблемы, касающиеся пропорциональной подачи сжигаемой смеси воздуха и биогаза.

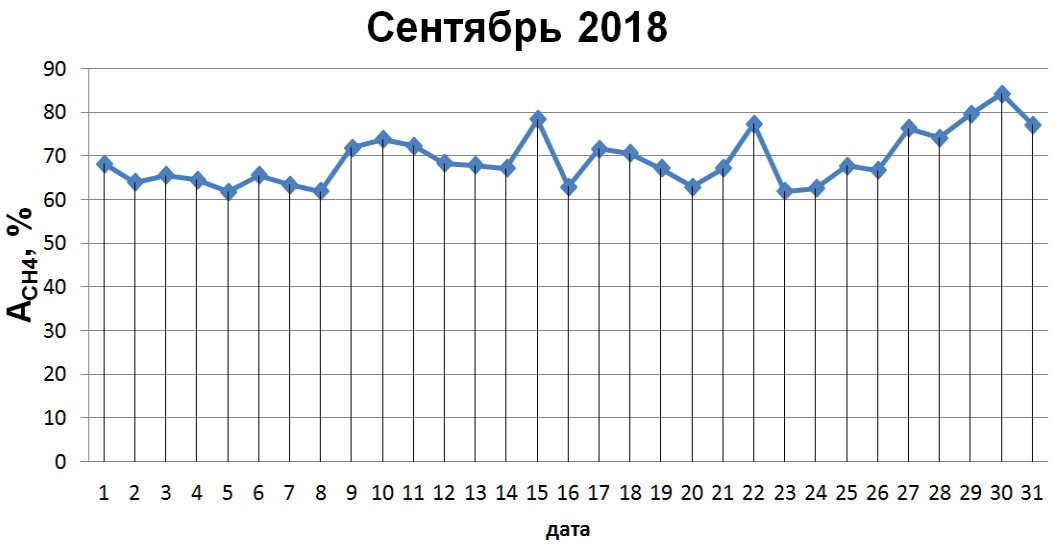


Рис. 1. Динамика изменения среднесуточного значения объемной доли метана биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» в сентябре 2018 г.

Предлагаемые технические решения. При использовании биогаза в качестве топлива в большинстве современных горелочных устройств происходит снижение КПД и ограничение диапазона регулирования нагрузки.

Для повышения эффективности сжигания метаносодержащих газовых смесей с широким диапазоном изменения объемной доли метана, в том числе биогаза, предложено горелочное устройство [19], конструкция которого показана на рис. 2. Газовая горелка содержит паропровод 1, механический привод 2, редуктор 3, пластинчатый теплообменный аппарат 4, корпус горелки 5, внутри которого расположены внешний 6 и внутренний 7 газоподводящие каналы, выход каждого из которых соединен с группой сопел 9 и 10, воздухоподводящий канал 11, подшипники скольжения 12, механические передаточные ремни (цепи) 13, конденсатоотводчик 14. Сопла 9 и 10 направлены в противоположные стороны, причем внешний 6 и внутренний 7 газоподводящие каналы выполнены с перфорацией 8 и при работе горелки вращаются навстречу друг другу.

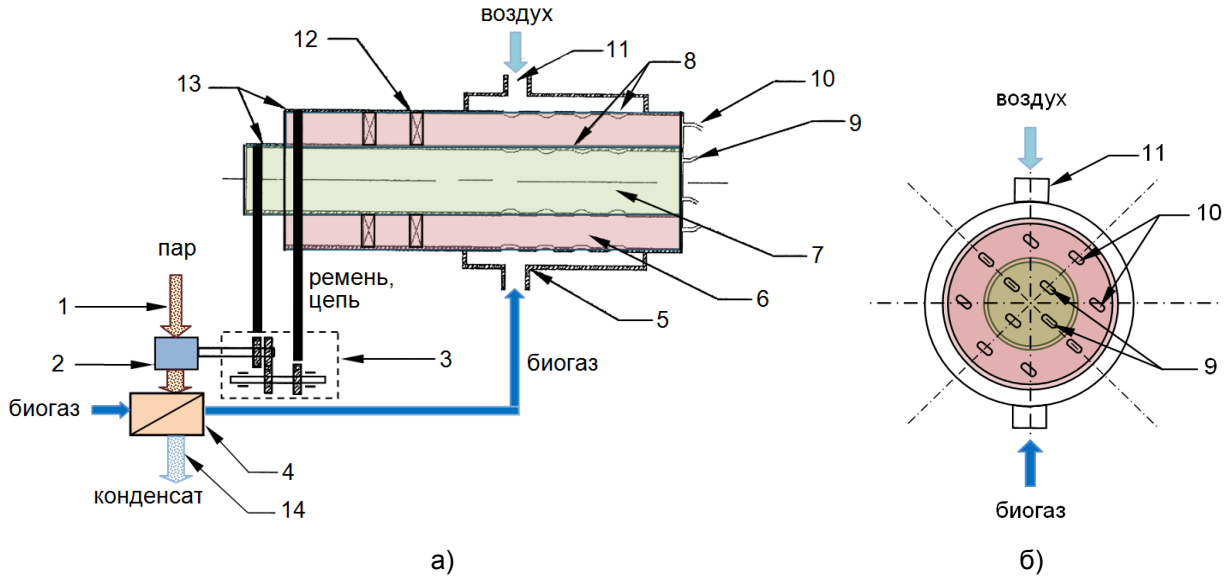


Рис. 2. Конструкция газовой горелки: а – общий вид; б – профильный вид; 1 – паропровод; 2 – механический привод; 3 – редуктор; 4 – пластинчатый теплообменный аппарат; 5 – корпус горелки; 6 – внешний газоподводящий канал; 7 – внутренний газоподводящий канал; 8 – перфорация; 9, 10 – сопла; 11 – воздухоподводящий канал; 12 – подшипники скольжения; 13 – механические передаточные ремни (цепи); 14 – конденсатоотводчик

Работа газовой горелки осуществляется следующим образом: часть котлового пара подается через паропровод 1 в механический привод 2. При этом начинает вращаться цилиндрический редуктор 3, крутящий момент посредством механических передаточных ремней (цепей) 13 передается внутреннему 7 и внешнему 6 газоподводящим каналам через подшипники скольжения 12. Из турбины 2 пар попадает в пластинчатый парогазовый теплообменный аппарат 4, конденсируется в нем и затем удаляется через конденсатоотводчик 14. Биогаз подается в теплообменник 4 с начальными значениями температуры T_1 и давления P_1, нагревается и расширяется в нем, при этом температура и давление биогаза после теплообменника изменяются до значений T_2 и P_2, затем нагретый биогаз попадает в корпус 5 и через перфорацию 8 распределяется во внешнем 6 и внутреннем 7 газоподводящих каналах. Встречное вращение перфорированных трубопроводов внешнего и внутреннего газоподводящих каналов обусловливает высокую интенсивность смешения воздуха и биогаза, при этом устанавливается турбулентный режим течения газовоздушной смеси. Полученная смесь воздуха и биогаза поступает в сопла 9 и 10, направленные противоположно друг другу. Конструкция горелки позволяет регулировать количество подаваемого воздуха через воздухоподводящий канал 11. Благодаря эффекту вращения перфорированных трубопроводов газоподводящих каналов повышается качество смесеобразования и, как следствие, полнота сгорания потока метаносодержащей газовой смеси [19]. Тепловое расширение подаваемого биогаза в парогазовом теплообменнике обеспечивает значительное увеличение интенсивности турбулизации потока газовоздушной смеси при ее сжигании. При этом повышаются экономичность и КПД горелки, в особенности при использовании в качестве топлива газовых смесей с низким содержанием метана.

Результаты исследования. Для оценки показателей энергетической эффективности газовой горелки предложенной конструкции проведены статистические исследования математической модели процесса на примере сжигания биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» с динамическим диапазоном изменения объемной доли метана от 62 до 86 %.

В качестве входных параметров в исследованиях использовались характеристики исходной газовой смеси, теплотворная способность топлива, скорость подачи топлива, температура воздуха, коэффициент избытка воздуха α; в качестве выходных параметров были определены КПД горелки η и удельный расход топлива на 1 ГДж производимой теплоты $b_т$. Термохимическая реакция горения метана при сжигании 1 моль метана описывается уравнением

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + 892{,}8 \text{ кДж}. \quad (1)$$

Задачей многофакторного эксперимента было установление зависимостей ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа ΔCO_2 (%), удельных затрат условного топлива на вырабатываемое тепло $b_{ут}$ (кг.у.т./Гкал) и коэффициента полноты сгорания топлива $k_{сг}$ (%) от скорости подачи биогаза (10^{-3} м^3/с), температуры подаваемого воздуха (°С), объемной доли метана (%). Регрессионная модель, описывающая процесс сжигания биогаза в исследуемой горелке, включает следующие уравнения:

– для ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа ΔCO_2 (%):

$$y_1 = 49{,}3 + 1{,}8x_1 + 1{,}4x_3 + 2{,}6x_{12} + 8{,}4x_{22} + 3{,}8x_{32}; \quad (2)$$

– удельных затрат условного топлива на вырабатываемое тепло $b_{ут}$ (кг.у.т/МДж):

$$y_2 = 29{,}3 - 0{,}012x_2 - 0{,}037x_3 + 0{,}011x_1x_3 + 0{,}540x_{12} + 0{,}139x_{22} + 0{,}321x_{32}; \quad (3)$$

– коэффициента полноты сгорания топлива $k_{сг}$ (%):

$$y_3 = 227{,}4 + 22{,}7x_1 + 19{,}4x_2 + 42{,}5x_3 - 11{,}7x_1x_2 - 62{,}3x_{12} - 29{,}3x_{22} + 44{,}1x_{32}, \quad (4)$$

где x_1 – безразмерная скорость подачи биогаза; x_2 – безразмерная температура воздуха; x_3 – безразмерная объемная доля метана; x_1, x_2, x_3 представлены в условных единицах.

Для перевода в условные единицы нужно воспользоваться следующими уравнениями:

$$x_1 = (V_б - 0{,}05)/0{,}02; \quad (5)$$

$$x_2 = (t_в - 70)/50; \quad (6)$$

$$x_3 = (A_{CH_4} - 70)/10, \quad (7)$$

где $V_б$ – скорость подачи газовоздушной смеси, дм^3/с; $t_в$ – температура воздуха, °С; A_{CH_4} – объемная доля метана, %.

По результатам математического моделирования установлены оптимальные пределы значений скорости подачи газовоздушной смеси, температуры подаваемого воздуха, объемной доли метана в целях получения наибольшей ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа ΔCO_2.

Так, при содержании метана в биогазе 62 % оптимальными являются скорость подачи воздуха от –1 до 0,4 у.е. (от 0,03 до 0,048 10^{-3} м^3/с) и температура воздуха от –0,5 до +0,5 у.е. (от 45 до 95 °С). При возрастании объемной доли метана в биогазе до 86 % изменяются оптимальные значения скорости подачи от –1 до 0,4 у.е. (от 0,03 до 0,048 10^{-3} м^3/с) и температура воздуха от –0,6 до +0,6 у.е. (от 40 до 100°С). При этом значение коэффициента полноты сгорания топлива $k_{сг}$ возрастает на величину от 27 (для A_{CH_4} = 67 %) до 32 % (для A_{CH_4} = 86 %).

Таким образом, сравнение предложенной конструкции с аналогичными показывает лучшее сгорание смеси газа и воздуха, а также более высокую эффективность преобразования энергии и эксплуатационную надежность, поскольку газовая горелка такой конструкции не требует регулирования положения сопел в соответствии с углом потока газа или изменением формы сопла выхода. Предлагаемая горелка может быть предназначена для высокоэкономичного и экологически чистого сжигания метаносодержащих газовых смесей с широким диапазоном объемной доли метана, в том числе природного газа, пропан-бутановой смеси, технологических газов различных производств, синтетических, биологических, коксодоменных и других газов. Оригинальный способ сжигания топлива позволяет регулировать длину факела, сохраняя оптимальные эксплуатационные свойства во всем диапазоне регулирования с максимальной объемной интенсивностью, обеспечивает высокую устойчивость горения в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха, равномерное температурное поле в топке (камере сгорания) и высокие экологические и технико-экономические показатели.

Проблема, возникающая во время эксплуатации традиционных горелок распространенного в черной металлургии типа ГТН, ГНП или аналогичных, сводится к необходимости адаптации промышленных типов горелок к сжиганию обедненных газовых смесей, например таких, как биогаз, путем уменьшения подачи воздуха, поскольку для полного сгорания 1 м^3 биогаза необходимо приблизительно 6 м^3 воздуха, в то время как 1 м^3 бутана требует чуть более 30 м^3 воздуха, а один 1 м^3 пропана требует почти 24 м^3 воздуха.

Предлагаемая конструкция горелки может применяться на любых паровых и водогрейных котлах (ДКВР, Е, ДЕ, КЕ, ГМ, БГМ, КВГМ, ПТВМ, ВК, КБНГ, КВГ, ТВГ, НИИСТУ, Факел, Радиант, Инвеста и др.), в металлургических печах, печах обжига, сушилках (ДСП, ЖСК и др.) и т.п. Номинальная тепловая мощность горелок данного типа может варьироваться в пределах от 0,3 до 35,0 МВт.

Выводы. Сравнение предложенной конструкции газовой горелки с аналогичными показывает значительное улучшение (до 32 %) коэффициента полноты сгорания газовоздушной смеси, а также более высокую эффективность преобразования энергии и эксплуатационную надежность, поскольку газовая горелка такой конструкции не требует регулирования положения сопел в соответствии с углом потока газа или изменением формы выходного сопла.

Список литературы

1. **Бухмиров В.В., Кокарев Н.Ф., Садчиков А.В.** Биоэнергетическая станция «ЭкоВольтАгро» для переработки органических отходов // Агротехника и энергообеспечение. – 2018. – № 1(18). – С. 60–69.

2. **Обеспечение** энергетической независимости и улучшение экологической безопасности полигонов ТКО / А.В. Садчиков, В.Ю. Соколов Н.Ф. Кокарев, С.А. Наумов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2016. – № 15–18(203–206). – С. 104–111.

3. **Bukhmirov V.V., Sadchikov A.V., Kokarev N.F.** Installation of separation of methane-containing gas mixtures of the bioenergy station «Eco-Volt-Agro» // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1111. – 2018. 012058 IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1111/1/012058. Режим доступа: http://iopscience.iop.org/nsearch?terms=Sadchikov

4. **Тиракьян А.С., Макаренко С.Ф., Костров Ю.А.** Разделение газовых смесей с помощью мембран из полых волокон // Химволокно. − 1988. − С. 26.

5. **Mehrotra A., Ebner A.D., Ritter J.A.** Arithmetic approach for complex PSA cycle scheduling // Adsorption. − 2010. − Vol. 16, No. 3. − P. 113–126.

6. **Agarwal A., Biegler L.T., Zitney S.E.** A superstructure-based optimal synthesis of PSA cycles for post-combustion CO_2 capteffectively captureure // AIChE Journal. − 2010. − Vol. 56, No. 7. − P. 1813–1828.

7. **Betlem B.H.L., Gotink R.W.M., Bosch H.** Optimal operation of rapid pressure swing adsorption with slop recycling // Computers and Chemical Engineering. − 1998. − Vol. 22. − Supplement 1. − P. S633–S636.

8. **Шумяцкий Ю.И.** Промышленные адсорбционные процессы. – М.: Колосс, 2009. − 183 с.

9. **Семавин Р.А.** Разделение и очистка метаносодержащих газовых смесей с помощью режима гидратации // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 2–2. – С. 86–88.

10. **Набиуллина А.Р., Котляр М.Н.** Очистка биогаза от примесей для применения в теплоэнергетике // YOUNG ELPIT 2015. Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов: сб. ст. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2015. – С. 232–237.

11. **Рязанцев А.А., Глазков Д.В., Просяников Е.Д.** Очистка биогаза от сероводорода // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3(38). – С. 19–24.

12. **Очистка** биогаза в микробарботажной колонне / М.А. Носырев, А.М. Трушин, Р.Б. Комляшев и др. // Химическая промышленность сегодня. – 2018. – № 3. – С. 32–37.

13. **Идигенов А.Б., Филатов М.И.** Установка комбинированной очистки биогаза // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2 (71). – С. 94–101.

14. **Колтакова Ю.О.** Подготовка свалочного газа для утилизации на энергетических установках // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сб. ст. IX Междунар. науч.-практич. конф. – Курск, 2017. – С. 129–131.

15. **Наумов С.А., Соколов В.Ю.** Факторы, влияющие на производство и очистку биогаза в технологическом процессе // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. (XX Всерос.) науч.-техн. конф. (Бенардосовские чтения). – Иваново, 2019. – С. 233–237.

16. **Bukhmirov V.V., Sadchikov A.V., Kokarev N.F.** Increase Methane Emission of Biogas Plant Using Combined Charging Raw Materials // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon). – 2018. – P. 156–160. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8544278

17. **Пат.** 2479790 Российская Федерация, МПК F 23 D 14/02, F 23 D 14/62. Газовая горелка / В.Ю. Соколов, С.А. Наумов, А.В. Садчиков и др.; заявл. 15.07.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11.

18. **Use** of ceramic injection molding technology to increase biogas burners efficiency / V.Y. Sokolov, S.A. Naumov, A.V. Sadchikov, S.V. Mitrofanov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 127–131. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.736.1799

19. **Пат.** 2471118, МПК RU RU F23D 14/66; F23D 14/02. Газовая горелка / В.Ю. Соколов, С.А. Наумов, А.В. Садчиков и др.; заявл. 08.08.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

References

1. Bukhmirov, V.V., Kokarev, N.F., Sadchikov, A.V. Bioenergeticheskaya stantsiya «EkoVol'tAgro» dlya pererabotki organicheskikh otkhodov [Bioenergy plant “EcoVoltAgro” for organic waste processing]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2018, no. 1(18), pp. 60–69.

2. Sadchikov, A.V., Sokolov, V.Yu., Kokarev, N.F., Naumov, S.A. Obespechenie energeticheskoy nezavisimosti i uluchshenie ekologicheskoy bezopasnosti poligonov TKO [Energy power independence and improvement of ecological safety of solid municipal waste site]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya»*, 2016, no. 15–18(203–206), pp. 104–111.

3. Bukhmirov, V.V., Sadchikov, A.V., Kokarev, N.F. Installation of separation of methane-containing gas mixtures of the bioenergy station «Eco-Volt-Agro». IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1111. 2018. 012058 IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1111/1/012058. http://iopscience.iop.org/nsearch? terms=Sadchikov

4. Tirak'yan, A.S., Makarenko, S.F., Kostrov, Yu.A. Razdelenie gazovykh smesey s pomoshch'yu membran iz polykh volokon [Separation of gas mixtures with the membranes of hollow fibers]. *Khimvolokno*, 1988, p. 26.

5. Mehrotra, A., Ebner, A.D., Ritter, J.A. Arithmetic approach for complex PSA cycle scheduling. *Adsorption*, 2010,vol. 16, no. 3, pp. 113–126.

6. Agarwal, A., Biegler, L.T., Zitney, S.E. A superstructure-based optimal synthesis of PSA cycles for post-combustion CO2 capteffectively captureure. *AIChE Journal*, 2010, vol. 56, no. 7, pp. 1813–1828.

7. Betlem, B.H.L., Gotink, R.W.M., Bosch, H. Optimal operation of rapid pressure swing adsorption with slop recycling. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, vol. 22, supplement 1, pp. S633–S636.

8. Shumyatskiy, Yu.I. *Promyshlennye adsorbtsionnye protsessy* [Industrial adsorptive processes]. Moscow: Koloss, 2009. 183 p.

9. Semavin, R.A. Razdelenie i ochistka metanosoderzhashchikh gazovykh smesey s pomoshch'yu rezhima gidratatsii [Separation and purification of gas mixtures by hydration mode]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologiy*, 2017, no. 2–2, pp. 86–88.

10. Nabiullina, A.R., Kotlyar, M.N. Ochistka biogaza ot primesey dlya primeneniya v teploenergetike [Purification of biogas for application in heat power engineering]. *Sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «YOUNG ELPIT 2015. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti promyshlenno-transportnykh kompleksov»* [Ecology and safety of industrial-transportation complex: collected papers VII International scientific-technical conference]. Samara, 2015, pp. 232–237.

11. Ryazantsev, A.A., Glazkov, D.V., Prosyanikov, E.D. Ochistka biogaza ot serovodoroda [Hydrogen sulfide stripping of biogas]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2016, no. 3(38), pp. 19–24.

12. Nosyrev, M.A., Trushin, A.M., Komlyashev, R.B., Kabanov, O.V., Kuznetsova, I.K. Ochistka biogaza v mikrobarbotazhnoy kolonne [Purification of biogas in microbubble column]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2018, no. 3, pp. 32–37.

13. Idigenov, A.B., Filatov, M.I. Ustanovka kombinirovannoy ochistki biogaza [Installation of biogas combined treatment]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 2, no. 2(71), pp. 94–101.

14. Koltakova, Yu.O. Podgotovka svalochnogo gaza dlya utilizatsii na energeticheskikh ustanovkakh [Pretretment of landfill gas for recycling at energy power units]. *Sbornik statey IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda»* [Topical issues of ecology and labor safety: collected papers IX International scientific-practical conference]. Kursk, 2017, pp. 129–131.

15. Naumov, S.A., Sokolov, V.Yu. Faktory, vliyayushchie na proizvodstvo i ochistku biogaza v tekhnologicheskom protsesse [Factors that influence the production and purification of biogas in technological process]. *Materialy Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Current state and opportunities of development of electro- and heat technology: conference proceedings of International (XX All Russian) scientific-technical conference (Bernadoovskie readings)]. Ivanovo, 2019, pp. 233–237.

16. Bukhmirov, V.V., Sadchikov, A.V., Kokarev, N.F. Increase Methane Emission of Biogas Plant Using Combined Charging Raw Materials. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon),* 2018, pp. 156–160. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/ stamp.jsp?tp=&arnumber=8544278

17. Sokolov, V.Yu., Naumov, S.A., Sadchikov, A.V., Goryachev, S.V., Korobkov, A.I., Lavrent'ev, A.V. *Gazovaya gorelka* [Gas-fired burner]. Patent RF, no. 2479790, 2013.

18. Sokolov, V.Yu., Naumov, S.A., Sadchikov, A.V., Mitrofanov, S.V. Use of ceramic injection molding technology to increase biogas burners efficiency. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 127–131. doi:10.4028/www.scientific.net/ KEM.736.1799

19. Sokolov, V.Yu., Naumov, S.A., Sadchikov, A.V., Goryachev, S.V., Lavrent'ev, A.V., Korobkov, A.I. *Gazovaya gorelka* [Gas-fired burner]. Patent RF, no. 2471118, 2012.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Валерий Павлович Голов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: golov@ispu.ru

Андрей Вадимович Калуцков
ПАО «ФСК ЕЭС» Московское предприятие Магистральных электрических сетей, инженер, Россия, Москва, e-mail: andy405@yandex.ru

Дмитрий Николаевич Кормилицын
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: dnk@es.ispu.ru

Ольга Сергеевна Суханова
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Критерий апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ[1]

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время существует необходимость синхронизации работы удаленных участков электроэнергетической системы страны и повышения пропускной способности существующих линий. Сооружение новых линий электропередач предполагает большие экономические затраты. В известных работах рассматривается применение управляемых устройств продольной емкостной компенсации только на дальних линиях электропередачи напряжением 500 кВ и выше для увеличения пропускной способности и улучшения устойчивости. Целью исследования является повышение устойчивости и предела передаваемой мощности при установке управляемых устройств продольной компенсации на линиях 220 кВ. Необходимо сформировать критерий апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы, содержащей управляемую линию электропередачи 220 кВ.

[1] Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (соглашение 075-15-2020-038 от 17.03.2020).
The project is carried out with financial assistance of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Grant of President of the Russian Federation to Support Young Researchers – Candidate of Science of Russia (agreement 075-15-2020-038 dated 17.03.2020).

© Голов В.П., Калуцков А.В., Кормилицын Д.Н., Суханова О.С., 2020
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 6, с. 14–24.

Материалы и методы. Использованы методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процессов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. Для составления упрощенной математической модели использован метод первого приближения А.М. Ляпунова. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение.
Результаты. Произведен анализ влияния коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации на апериодическую статическую устойчивость электроэнергетической системы и пропускную способность линии электропередач 220 кВ. Выявлено изменение модуля падения напряжения на электропередаче и угловых характеристик под влиянием коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации. Сформирован критерий апериодической статической устойчивости для подобного рода систем с управляемой продольной компенсацией, отличающийся от традиционных учетом изменения падения напряжения в электропередаче и позволяющий более точно оценивать приближение к границе устойчивости. Получена оценка апериодической статической устойчивости для электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ по сформированному критерию. Определены значения коэффициентов регулирования устройства продольной компенсации, при которых не происходит нарушения статической устойчивости.
Выводы. Полученные результаты могут использоваться для решения вопросов повышения пропускной способности ЛЭП при улучшении устойчивости системы.

Ключевые слова: апериодическая статическая устойчивость, линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, управляемые устройства продольной компенсации, коэффициенты регулирования устройства продольной компенсации, критерий устойчивости электроэнергетической системы

Valery Pavlovich Golov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electric Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: golov@ispu.ru

Andrew Vadimovich Kalutskov
PJSC «FGC UES» Moscow Enterprise of the Main Power Networks, Engineer, Russia, Moscow,
e-mail: andy405@yandex.ru

Dmitry Nikolaevich Kormilitsyn
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electric Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dnk@es.ispu.ru

Olga Sergeevna Sukhanova
Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student of Electric Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Aperiodic steady-state stability criterion of electric power system with controlled series compensation on 200 kV line

Abstract

Background. Currently there is a need to synchronize operation of the electric power system in the remote areas and increase of existing lines transmission capacity. The construction of new power transmission lines involves high economic expenditures. Well-known papers consider the issues of application of controlled series compensation devices only for long-distance power transmission lines with voltage of 500 kV and higher to increase the transmission capacity and the level of stability. The aim of the study is to increase the stability and the limit of the transmitted power when controlled series compensation devices are installed on 220 kV lines. It is necessary to develop a criterion of aperiodic steady-state stability of an electric power system with a 220 kV-controlled power transmission line.
Materials and methods. Methods of mathematical modeling of electric power system, the theory of long-distance power transmission lines and electromechanical transients, and methods of analyzing electric power system stability were used. A.M. Lyapunov's first approximation method was used to develop a simplified mathematical model. We applied the developed software as a simulation tool.
Results. An analysis was carried out to study the influence of series compensation devices regulation coefficients on the aperiodic steady-state stability of the electric power system and the transmission capacity of 220 kV power transmission lines. A change in the modulus of voltage drop at the power transmission and the

angle characteristics under the influence of the regulation coefficients of the series compensation device was revealed. A criterion of aperiodic steady-state stability has been developed for systems of this kind with controlled series compensation. It differs from traditional ones by considering the changes in the voltage drop in the power transmission and it allows more accurate estimation of the proximity to the stability threshold. An assessment of aperiodic steady-state stability according to the formulated criterion for an electric power system with a controlled series compensation device on a 220 kV line was obtained. The values of the control coefficients of the series compensation device have been determined. No violation of the steady-state stability occurs under the given values.

Conclusions. The results can be used to solve the issues of increasing the transmission capacity of transmission lines to improve the stability of the system.

Key words: aperiodic steady-state stability, power transmission lines of high and ultra-high voltage, controlled series compensation devices, regulation coefficients of the series compensation devices, stability criterion of electric power system

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.014-024

Введение. Управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) значительно увеличивают предел передаваемой мощности и улучшают устойчивость системы с линиями электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) [1–4]. Однако использование УУПК только в системах СВН ограничивает область их применения [5]. В настоящее время существует необходимость в расширении производства электроэнергии в местах сосредоточения дешевых энергоресурсов. Генерирующие мощности находятся за сотни километров от больших центров потребления. Таким образом, встает проблема надежной передачи электроэнергии на дальние расстояния по линиям высокого напряжения (ВН).

Одной из главных задач является анализ применения в системах с напряжением 220 кВ УУПК, которые использовались в передачах СВН.

Принимая во внимание наличие аварийных ситуаций в энергосистеме России, которые приводили к достижению предельных значений передаваемых мощностей по линиям ВН в резервных схемах, необходимо провести анализ установки регулируемого УПК в системах ВН [6].

Материалы и методы. ***Модель рассматриваемой электроэнергетической системы.*** Исследование производилось для простейшей электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП ВН (рис. 1). Генераторы электрической станции с суммарной номинальной мощностью 600 МВт соединены с системой двухцепной линией электропередачи 220 кВ длиной 126 км с установленным посередине устройством УУПК. На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР). На рис. 2 представлена схема замещения исследуемой системы.

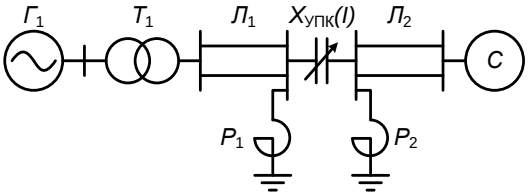


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система, содержащая управляемую ЛЭП СВН

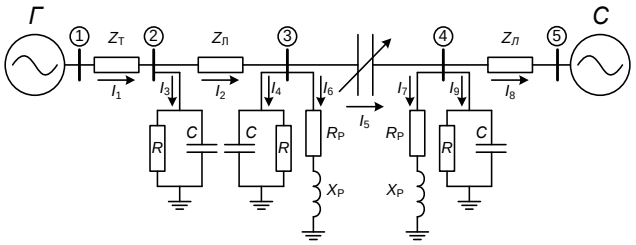


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Регулирование УУПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [7]:

$$X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_1 - K_2 I)}, \quad (1)$$

где $X_{\text{УПК}}(I)$ – сопротивление регулируемого УПК, Ом; I – ток линии (в месте установки УПК), кА; K_1, K_2 – коэффициенты регулирования УПК, мкФ и мкФ/кА соответственно.

Оценка предела апериодической статической устойчивости производится по математической модели [8]:

$$p[\psi_{\text{ст}}] = \omega_0 \left(-[u_{\text{ст}}] - r_{\text{а}}[i_{\text{ст}}] - \frac{\omega}{\omega_0}[\gamma][\psi_{\text{ст}}] \right), \quad (2)$$

где $[\psi_{ст}]=\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_q\end{bmatrix}$; $[u_{ст}]=\begin{bmatrix}u_d\\ u_q\end{bmatrix}$; $[i_{ст}]=\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\end{bmatrix}$; $[\gamma]=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{bmatrix}$; ω_0 – синхронная угловая частота вращения; r_a – активное сопротивление обмоток статора; ω – угловая частота вращения генератора; ψ_d, ψ_q – потокосцепления контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно; u_d, u_q – напряжения контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно; i_d, i_q – токи контуров статора по продольной и поперечной оси соответственно.

Сформированная модель позволяет рассчитывать как установившиеся, так и переходные режимы системы.

Результаты. ***Особенности угловых характеристик активной мощности и зависимостей падения напряжения на электропередаче.*** Расчет установившихся режимов системы выполнен по математической модели с помощью оригинального программного обеспечения на языке программирования C++ [9]. Построение угловых характеристик системы осуществлялось утяжелением режима по углу и по току для выявления изменений всех параметров и особенностей влияния УУПК.

В простейшем виде, без учета поперечных сопротивлений в схемах замещения элементов, схема замещения рассматриваемой сети после преобразований показана на рис. 3.

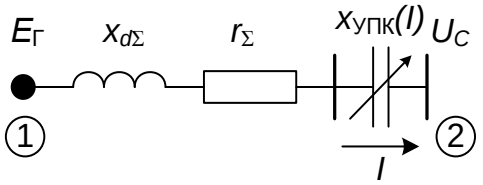


Рис. 3. Схема замещения после преобразования

Явление резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре возникает на частоте ω, при которой индуктивное сопротивление катушки $x_L=\omega L$ совпадает с емкостным сопротивлением конденсатора $x_C=\dfrac{1}{\omega C}$. В этом случае по закону Ома ток в цепи будет максимальным $I=\dfrac{U}{R}$. В результате напряжения на катушке $U_L=I\,x_L$ и конденсаторе $U_C=I\,x_C$ окажутся равными и будут иметь максимально большое значение, которое может значительно превышать напряжение на источнике ЭДС.

На практике частота ω изменяется незначительно и возникновение резонанса напряжений возможно только при большом отклонении частоты. В данном случае явления, эквивалентные резонансным, могут происходить в результате изменяющегося в функции тока емкостного сопротивления УУПК [7].

Введем понятие падения напряжения N в электропередаче между узлами 1 и 2 (см. рис. 3). Для упрощения понимания рассмотрим ту же систему, но без учета активных сопротивлений (рис. 4).

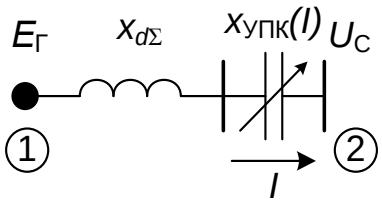


Рис. 4. Схема замещения рассматриваемой сети без учета активных сопротивлений

Значение модуля падения напряжения можно получить исходя из векторной диаграммы для данной сети (рис. 5).

Зная взаимный угол векторов напряжения системы и эквивалентного генератора, а также значения модулей этих векторов, можно определить модуль падения напряжения по теореме косинусов:

$$|N|=\sqrt{E_Г^2-2E_Г U_C\cdot\cos\delta+U_C^2}. \qquad (3)$$

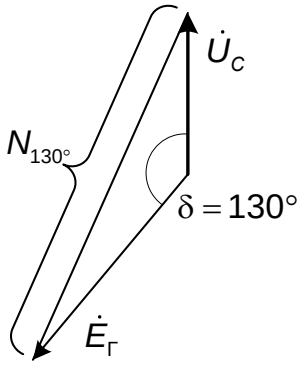


Рис. 5. Векторная диаграмма падения напряжения в связи

Кроме того, исходя из возможных значений взаимных углов в диапазоне от 0 до 180° можно определить минимальное N_{min} и максимальное N_{max} значения падения напряжения (рис. 6).

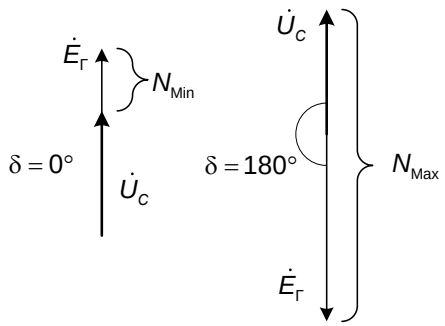


Рис. 6. Векторная диаграмма минимального и максимального падения напряжения

С другой стороны, данное падение напряжения можно рассчитать следующим образом:

$$N(I) = I\left(x_{d\Sigma} - X_{УПК}(I)\right); \quad (4)$$

$$N(I) = I\left(x_{d\Sigma} - \frac{10^6}{\omega\left(K_1 - K_2\, I \cdot I_б\right) Z_б}\right). \quad (5)$$

Раскрыв скобки в выражении (5), получим

$$N(I) = \left(I\, x_{d\Sigma}\right) - \left(I \frac{10^6}{\omega\left(K_1 - K_2 I \cdot I_б\right) Z_б}\right). \quad (6)$$

На рис. 7 показана зависимость модуля падения напряжения в связи для различных законов регулирования УУПК.

Для выявления предела апериодической статической устойчивости воспользуемся критерием П.С. Жданова для рассматриваемой системы – положительностью свободного члена характеристического уравнения [10].

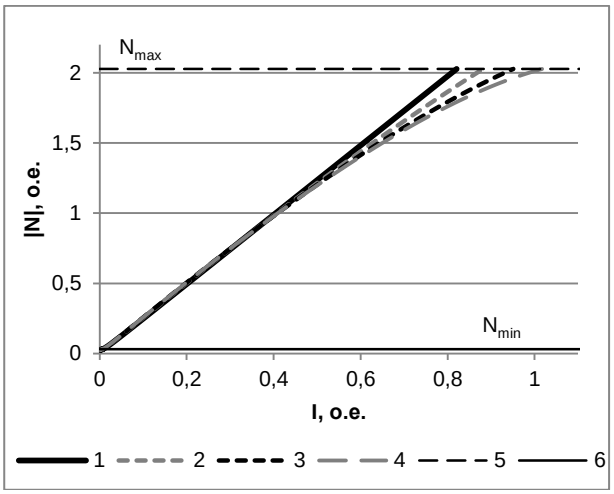


Рис. 7. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УПК для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 0; 2 – K_2 = 10; 3 – K_2 = 15; 4 – K_2 = 17; 5 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max}; 6 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}

Свободный член характеристического уравнения для рассматриваемой системы показан в следующем выражении:

$$a_2 = \frac{\partial I}{\partial \delta}\frac{\partial P}{\partial X_{УПК}}\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} - \frac{\partial P}{\partial \delta}\left(\frac{\partial I}{\partial X_{УПК}}\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} - 1\right). \quad (7)$$

В случае отсутствия регулирования УУПК частная производная $\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}$ обращается в ноль, при этом уравнение для свободного члена характеристического уравнения упрощается до традиционного для систем без регулируемых устройств [11]:

$$a_2 = \frac{\partial P}{\partial \delta}. \quad (8)$$

В данном случае с увеличением коэффициентов регулированя УУПК наблюдается смещение точки перехода через ноль свободного члена характеристического уравнения в сторону увеличения угла (рис. 8). Однако необходимо отметить, что данный эффект наблюдается в большей степени ввиду смещения положения пика угловой характеристики в сторону увеличения угла под воздействием УУПК (рис. 8). Частные производные, кроме $\frac{\partial P}{\partial \delta}$, входящие в выражение (7), оказывают слабое влияние на величину свободного члена характеристического уравнения. Поэтому величина свободного члена характеристического уравнения в большей степени определяется именно частной производной $\frac{\partial P}{\partial \delta}$, где $P = P(X_{УПК})$.

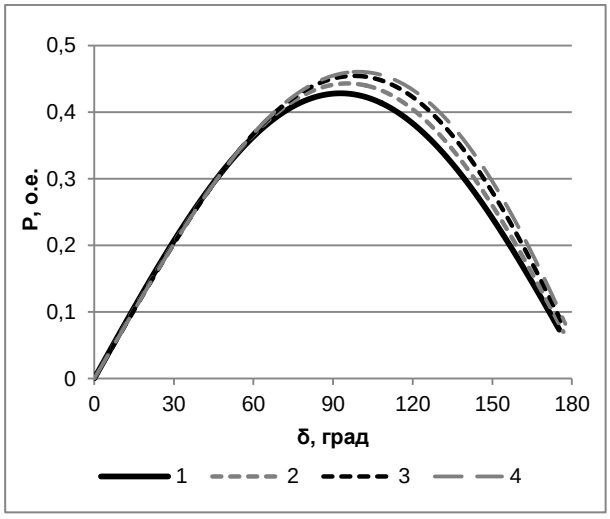


Рис. 8. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 0; 2 – K_2 = 10; 3 – K_2 = 15; 4 – K_2 = 17

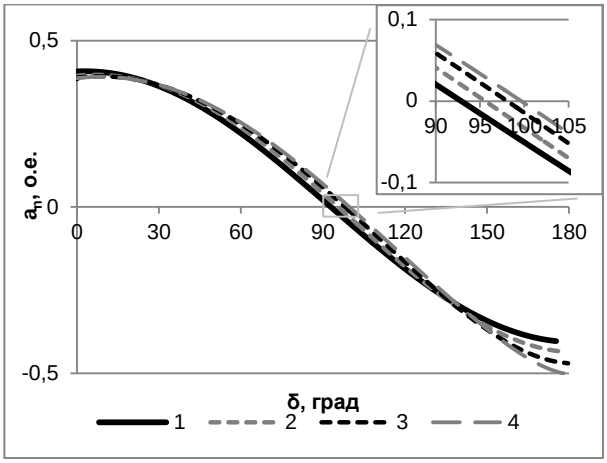


Рис. 9. Зависимость величины свободного члена характеристического уравнения от взаимного угла δ для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 0; 2 – K_2 = 10; 3 – K_2 = 15; 4 – K_2 = 17

Изменение коэффициентов регулирования устройств продольной компенсации влияет на функцию сопротивления УУПК от тока. Увеличение коэффициентов приводит к возрастанию вычитаемого в выражении (6) и, как следствие, к отклонению от линейного закона и увеличению крутизны зависимости |$N(I)$| (см. рис. 7). При дальнейшем увеличении коэффициента регулирования K_2 зависимость модуля падения напряжения от тока, не доходя до N_{max}, начинает уменьшаться из-за стремительного роста вычитаемого в (6).

Исходя из векторной диаграммы, при увеличении |N| угол сдвига δ также увеличивается. При этом в случае, если в какой-то точке зависимости $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$, т.е. имеет место точка (рис. 10, точка *а*), после которой |N| начинает уменьшаться, то на падающей части зависимости |$N(I)$| при увеличении тока в электропередаче активная мощность будет увеличиваться (рис. 11, участок *а–в*), а взаимный угол уменьшаться, что приведет, в теории, к образованию петлеобразных угловых характеристик.

Необходимо также отметить, что использование традиционного утяжеления режима по углу в случае наличия петлеобразных угловых характеристик ограничено, поскольку одному значению угла соответствует не единственное значение мощности. При задании некорректных начальных приближений расчет может сойтись не в нужной точке характеристики, например в точке *д* на рис. 10, 11, а не в точке *г*. Кроме того, построение петлеобразных угловых характеристик будет затруднено, поскольку при утяжелении режима системы по углу после точки *а* (рис. 11) произойдет резкий переход на нижнюю часть петли в точку *б*, сопровождающийся значительными изменениями режимных параметров.

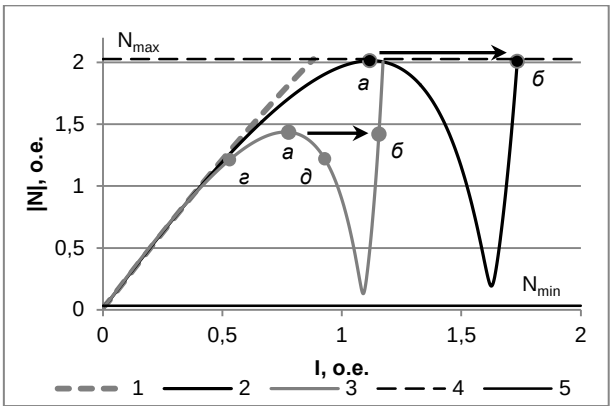


Рис. 10. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УПК для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 10; 2 – K_2 = 18; 3 – K_2 = 31; 4 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max}; 5 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}

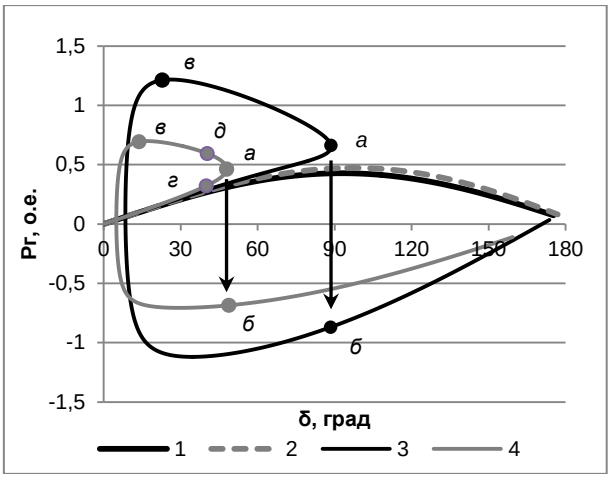


Рис. 11. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 0; 2 – K_2 = 10, 3 – K_2 = 27, 4 – K_2 = 31

Поэтому для таких случаев предложено утяжеление режима системы по току через УУПК, поскольку при этом каждому значению тока однозначно соответствует уникальный набор режимных параметров, в том числе и активной мощности [8].

Из-за наличия петлеобразных угловых характеристик традиционное представление зависимости свободного члена от угла затруднено, поскольку график зависимости

будет ненаглядным и сложным для восприятия. На рис. 13 представлены зависимости модуля падения напряжения на электропередаче и свободного члена характеристического уравнения от тока через УПК для тех же случаев, что и на рис. 12.

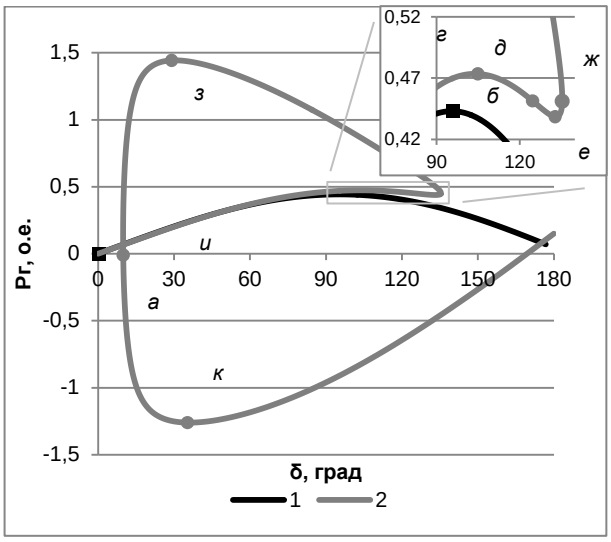


Рис. 12. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 10; 2 – K_2 =20

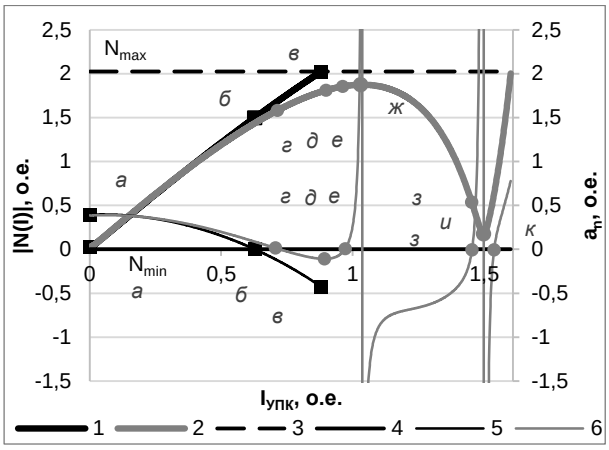


Рис. 13. Зависимости модуля падения напряжения на электропередаче (1–4) и свободного члена характеристического уравнения (5–6) от тока через УПК: 1 – K_2 = 10; 2 – K_2 = 20; 3 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max}; 4 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}; 5 – K_2 = 10; 6 – K_2 = 20

Поскольку величина свободного члена характеристического уравнения в большей степени определяется частной производной $\frac{\partial P}{\partial \delta}$, где $P = P(X_{УПК})$, то его величину можно оценить исходя из угла касательной к рассматриваемой точке графика.

В случае отсутствия петлеобразных угловых характеристик активной мощности зависимость свободного члена характеристического уравнения, как и для традиционной системы без регулируемых устройств, имеет ниспадающий характер (см. рис. 13, кривая 5).

Поскольку петлеобразные угловые характеристики активной мощности в данном случае отсутствуют, то в любой точке характеристики |*N*(*I*)| величина $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ (см. рис. 13, кривая 1). Зависимости на рис. 12 и 13 имеют одноименные характерные точки, которые соответствуют друг другу на разных зависимостях. Величина свободного члена характеристического уравнения, как и в традиционной сети, переходит через ноль вблизи предела передаваемой мощности (см. рис. 12 и 13, точка *б*).

Анализ зависимостей при наличии петлеобразных угловых характеристик показывает, что, если существует точка, в которой $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$, зависимость свободного члена характеристического уравнения перестает иметь ниспадающий характер и наблюдается ярко выраженный локальный минимум (см. рис. 13, кривая 6, точка *д*), после которого его величина начинает резкий рост. Кроме того, анализ поведения свободного члена характеристического уравнения позволяет предвидеть появление петлеобразной угловой характеристики в случае, если на каком-либо шаге утяжеления режима сети значение свободного члена характеристического уравнения начинает расти.

В точке образования петлеобразной угловой характеристики (см. рис. 12, точка *ж*) величина угла наклона касательной становится равной 90° и, следовательно, частная производная $\frac{\partial P}{\partial \delta}$ и свободный член характеристического уравнения стремятся к бесконечности. При дальнейшем увеличении тока угол касательной будет становиться больше 90° вплоть до точки *и*, где станет равным 180°. При этом свободный член характеристического уравнения будет увеличиваться от минус бесконечности до нуля.

Увеличение тока после точки *з* приведет к образованию новой зоны устойчивости, где $a_n > 0$ вплоть до точки *и*, где ка-

сательная снова становится равной 90°, а частная производная $\frac{\partial P}{\partial \delta}$ и свободный член характеристического уравнения стремятся к бесконечности. Поведение свободного члена характеристического уравнения после точки *и* эквивалентно процессам, происходящим при увеличении тока после точки *ж*.

В зависимости от коэффициента регулирования УУПК, положение минимума свободного члена характеристического уравнения также изменяется. Возможны такие случаи, при которых величина свободного члена, не переходя через ноль, начинает движение вверх (рис. 14, точка *л*), что свидетельствует о том, что система будет сохранять апериодическую устойчивость вплоть до точки образования петлеобразной угловой характеристики.

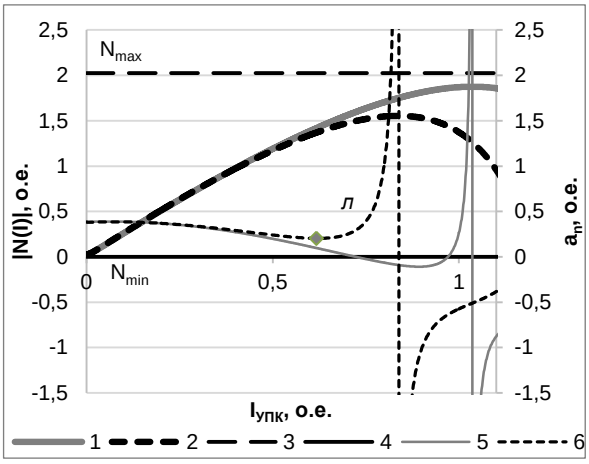


Рис. 14. Зависимости модуля падения напряжения на электропередаче (1–4) и свободного члена характеристического уравнения (5–6) от тока через УПК: 1 – K_2 = 20; 2 – K_2 = 27; 3 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max}; 4 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}; 5 – K_2 = 20; 6 – K_2 = 27

Угловые характеристики, на которых выделены устойчивые (более толстыми линиями) и неустойчивые (тонкими линиями) зоны с точки зрения знака свободного члена характеристического уравнения, соответствуют рассмотренным выше зависимостям. Одноименные точки на рис. 13–15 соответствуют друг другу на разных зависимостях.

Необходимо отметить, что физически наличие нескольких зон устойчивой работы не имеет смысла, поскольку перейти от одной зоны в другую, минуя неустойчивую, невозможно (рис. 15) [12]. Предельное значение мощности, при котором сохраняется устойчивость, определяется исходя из первого перехода значения свободного члена через ноль при утяжелении режима ЭЭС.

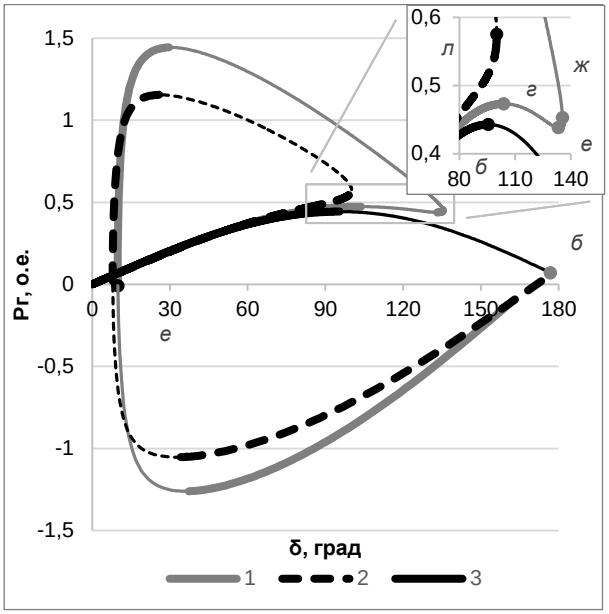


Рис. 15. Угловые характеристики мощности для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 20; 2 – K_2 = 27; 3 – K_2 = 10

В случае, когда на всем диапазоне углов величина $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ (а значит, отсутствуют петлеобразные угловые характеристики), предел апериодической устойчивости будет наблюдаться, как и в традиционной сети, при $\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0$ (см. рис. 13 и 15, точка *а*) [13]. В случае наличия точки, при которой $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$ (см. рис. 13 и 15, точка *д*), предел устойчивости может наблюдаться ранее этой точки, поскольку в точке *в* наблюдается переход свободного члена через ноль. В случае, если на всем диапазоне от 0° до точки, в которой $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$, выполняется условие $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$, то границей устойчивости будет являться именно эта точка (см. рис. 13 и 15, точка ж).

Таким образом, зависимость модуля падения напряжения в связи |*N*(*I*)| позволяет идентифицировать рабочие части угловых характеристик активной мощности генерато-

ров, которые соответствуют условиям $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ и $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$. Применение только критерия $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$ в данной сети некорректно, поскольку в традиционной сети при приближении к границе устойчивости величина этой частной производной приближалась к 0. В данном же случае в предельной точке (см. рис. 11, *а*), в которой угловая характеристика обращается в петлю, величина $\frac{\partial P}{\partial \delta} \to \infty$, что неудобно для отслеживания. Критерий $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ отлично подходит к подобного рода сетям, поскольку граница устойчивости наблюдается в точке $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$, принимая во внимание критерий $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$.

Одним из вариантов оптимальной настройки УУПК является выбор такого максимального коэффициента регулирования K_2, при котором величина $|N(I)|$ достигает N_{max} при величине угла, близкой к 180°. Тогда даже при динамических переходах критерий $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ будет выполняться. Однако в данном случае эффект от управляемой компенсации не используется полностью, поскольку при наличии петлеобразных характеристик предел передаваемой мощности при сохранении устойчивости оказывается значительно выше.

Для получения максимального эффекта от управляемой продольной компенсации необходимо при значении $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$ переходить к значению $X_{УПК}$ = const, соответствующему устойчивому режиму (рис. 16, поведение зависимостей после круглых маркеров), что позволит сохранить все положительные эффекты от управляемой компенсации и не допустить появления петлеобразных угловых характеристик.

При этом поведение зависимости $|N(I)|$ после ограничения $X_{УПК}$ будет подчиняться линейному закону по формуле (4) (рис. 17, поведение зависимостей после круглых маркеров) и образование петлеобразных угловых характеристик будет невозможно, поскольку при утяжелении величина $|N(I)|$ дойдет до N_{max}.

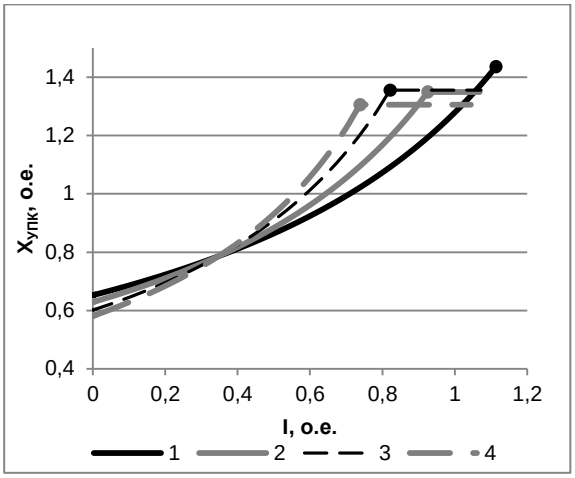


Рис. 16. Зависимость сопротивлений УПК от тока для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 18; 2 – K_2 = 22; 3 – K_2 = 27; 4 – K_2 = 31

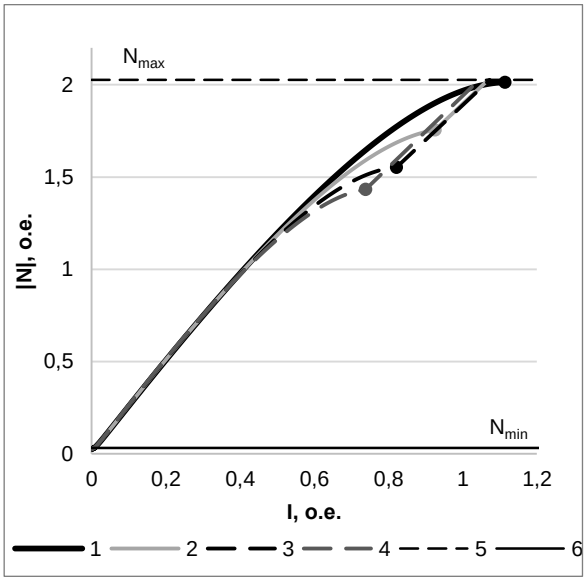


Рис. 17. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УПК при ограниченно-зависимой характиристике $X_{УПК}$ для различных законов регулирования: 1 – K_2 = 18; 2 – K_2 = 22; 3 – K_2 = 27; 4 – K_2 = 31; 5 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max}; 6 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}

При использовании ограничения величины сопротивления УУПК угловая характеристика $P(\delta)$ после ограничения становится традиционной, как для системы с неуправляемым УПК, и показывает увеличение предельной по статической устойчивости активной мощности в зависимости от закона регулирования сопротивления $X_{УПК}(I)$ (рис. 18).

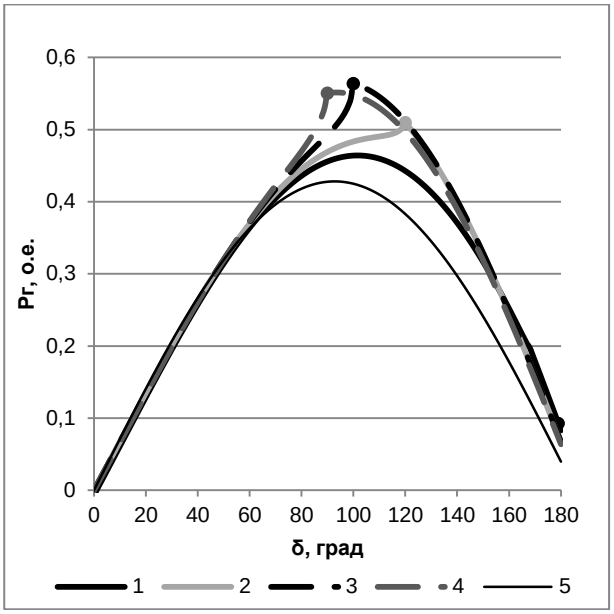


Рис. 18. Угловые характеристики при ограниченно-зависимой характиристике $X_{УПК}$ для различных законов регулирования УПК: 1 – K_2 = 18; 2 – K_2 = 22; 3 – K_2 = 27; 4 – K_2 = 31; 5 – K_2 = 0

При этом имеется некоторый экстремум, при котором наблюдается максимальный эффект от применения ограничения величины сопротивления УУПК. Для его выявления проведено исследование с планомерным изменением коэффициента K_2 с последующим выявлением предела мощности.

Выявленная зависимость (рис. 19) показывает наличие оптимума настройки коэффициента регулирования K_2, который приводит к максимально возможной величине предела передаваемой мощности.

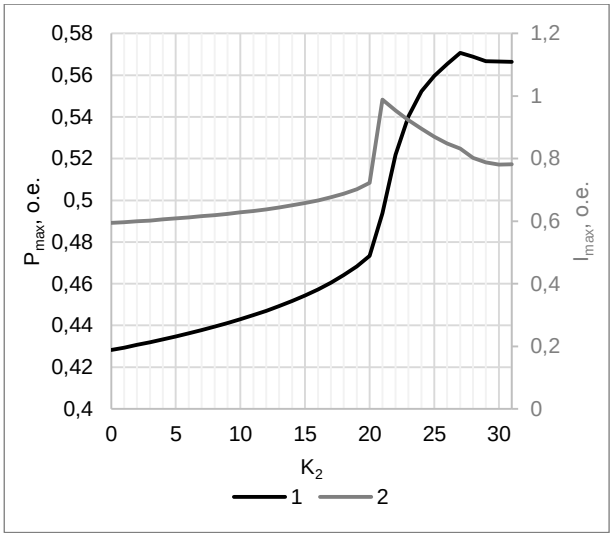


Рис. 19. Зависимости величин от коэффициента регулирования K_2 УУПК: 1 – предел передаваемой мощности; 2 – ток через УУПК при пределе передаваемой мощности

Кроме того, в эксперименте произведена оценка тока через УПК при пределе мощности на каждом значении K_2. Выявлено, что с ростом предела передаваемой мощности ток увеличивается, однако, после того как значение предела мощности начинает наблюдаться в точке ограничения сопротивления УПК, ток резко увеличивается, а затем снижается, что говорит о снижении токовой загрузки элементов сети при применении больших коэффициентов управляемой компенсации с увеличением предела мощности (рис. 19).

Выводы. Проведенное изучение влияния закона управления регулируемого устройства продольной емкостной компенсации на характеристики установившихся режимов рассматриваемой электрической системы показало его эффективность в плане повышения пределов передаваемой мощности.

Условие $\frac{\partial N(I)}{\partial I} > 0$ является критерием апериодической статической устойчивости в подобного рода системах с УУПК, так как возможно наличие участка угловых характеристик, на котором мощность возрастает до предельного значения, когда $\frac{\partial N(I)}{\partial I} < 0$ и устойчивая работа невозможна.

Анализ полученных характеристик позволяет сделать вывод, что использование УУПК в системах 220 кВ приводит к увеличению пропускной способности с различными законами регулирования, а также к снижению токовой загрузки элементов сети при увеличении коэффициентов управляемой компенсации.

Список литературы

1. **Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В.** О применении устройств продольной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. – 2016. – № 6 (29). – С. 26–41.

2. **Vaibhav Desai, Vivek Pandya, Anilkumar Markana.** Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation // International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015). – 2015. – P. 62–68.

3. **Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П.** Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми

устройствами гибких электропередач // Электричество. – 2013. – № 12. – С. 2–13.

4. **Eminoglu U., Hocaoglu M.H., Yalcinoz T.** Transmission Line Shunt and Series Compensation with Voltage Sensitive Loads // International Journal of Electrical Engineering Education. – October 2009. – Vol. 46, Issue 4. – P. 354–369.

5. **Электрические** сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012.

6. **Фокин В.К.** Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС – «Новокузнецкая», «Кузбасская» // Энергия единой сети. – 2013. – № 2(7). – С. 66–73.

7. **Голов В.П.** Применение регулируемой компенсации линий электропередач // Изв. вузов. Энергетика. –1978. – № 6. – С. 3–8.

8. **Устойчивость** электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Виноградова // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 26–31.

9. **Кормилицын Д.Н.** Программа для ЭВМ: «Controlled electric power system stability» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018660842; зарег. в реестре программ для ЭВМ 28.08.18.

10. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

11. **Костюк О.М.** Элементы теории устойчивости энергосистем. – Киев: Наукова думка, 1983. – 296 с.

12. **Электрические** системы. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.

13. **Куликов Ю.А.** Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Омега-Л, 2013. – 384 с.

References

1. Antonov, A.V., Fokin, V.K., Tuzlukova, E.V. O primenenii ustroystv prodol'noy kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii [On applying series compensation devices in Russian high-voltage electric networks]. *Energiya edinoy seti,* 2016, no. 6(29), pp. 26–41.

2. Vaibhav, Desai, Vivek, Pandya, Anilkumar, Markana. Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation. *International Journal of Engineering Research and Development (IJERD)*, 2015, pp. 62–68.

3. Shakaryan, Yu.G., Fokin, V.K., Likhachev, A.P. Ustanovivshiesya rezhimy raboty elektroenergeticheskikh sistem s setevymi ustroystvami gibkikh elektroperedach [Steady states modes of electric power systems with flexible power transmissions]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 12, pp. 2–13.

4. Eminoglu, U., Hocaoglu, M.H., Yalcinoz, T. Transmission Line Shunt and Series Compensation with Voltage Sensitive Loads. *International Journal of Electrical Engineering Education*, October 2009, vol. 46, issue 4, pp. 354–369.

5. D'yakov, A.F. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy: v 3 t.* [Unified power system electric networks of super and ultra-high voltage of Russia. Theoretical and practical bases: in 3 vol.]. Moscow: NTF «Energoprogress» Korporatsii «EEEK», 2012.

6. Fokin, V.K. Povyshenie vydachi moshchnosti Sayano-Shushenskoy GES s pomoshch'yu emkostnoy kompensatsii na linii SSh GES – «Novokuznetskaya», «Kuzbasskaya» [Power output ascension of Sayano-Shyshenskaya Hydroelectric Generating Plant by means of capacitive compensation along the SS Hydroelectric Generating Plant – “Novokuznetskaya”, “Kuzbasskaya” line]. *Energiya edinoy seti*, 2013, no. 2(7), pp. 66–73.

7. Golov, V.P. Primenenie reguliruemoy kompensatsii liniy elektroperedach [Application of controlled compensation on power lines]. *Izvestiya vuzov. Energetika,* 1978, no. 6, pp. 3–8.

8. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvin, I.A., Vinogradova, A.A. Ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy iz dvukh elektricheskikh stantsiy s reguliruemoy prodol'noy kompensatsiey [Stability of electrical power engineering system consisting of two electrical power stations with controlled series compensation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 26–31.

9. Kormilitsyn, D.N. *Controlled electric power system stability.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM [Certificate of Software Registration], no. 2018660842, 2018.

10. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 536 p.

11. Kostyuk, O.M. *Elementy teorii ustoychivosti energosistem* [Power system stability theory elements]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 296 p.

12. Venikov, V.A. *Elektricheskie sistemy. T. 1. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki* [Electrical systems. Vol. 1. Mathematical problems of electrical power industry]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 336 p.

13. Kulikov, Yu.A. *Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Transients in electric power systems]. Moscow: Omega-L, 2013, 384 p.

УДК 621.311.1

Сергей Геннадьевич Обухов
ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск, e-mail: serob@tpu.ru

Галина Николаевна Климова
ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск, e-mail: gariki@tpu.ru

Ахмед Ибрагим
ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск, e-mail: ibragim @tpu.ru

Методика оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из перспективных способов повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей, территориально расположенных в районах, удаленных от центральной электрической сети, является применение гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Первоочередной задачей проектирования таких систем является выбор состава генерирующего оборудования, обеспечивающего оптимальные технико-экономические показатели электроэнергетической системы. Стохастический характер генерации и нелинейность характеристик энергетических установок обусловливают высокую сложность решения данной проблемы, которая с математической точки зрения формулируется как оптимизационная задача. Точное и надежное решение данной оптимизационной задачи обеспечивает повышение эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии и является актуальной задачей современной энергетики.
Материалы и методы. Для построения временных климатических рядов и графиков электрических нагрузок использованы вероятностно-статистические методы и модели анализа экспериментальных данных, при исследовании рабочих режимов электроэнергетической системы применено имитационное моделирование в системе MatLab, для решения оптимизационной задачи использован эволюционный алгоритм роя частиц. В составе методики используется оригинальная модель солнечной радиации, обеспечивающая прогнозирование основных характеристик солнечного излучения в любой географической точке России, в том числе и для территорий, по которым отсутствуют результаты регулярных актинометрических наблюдений. Для прогнозирования суточного хода скорости ветра используется функция обратного распределения Вейбулла, обеспечивающая повышение достоверности прогнозирования выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой на суточных временных интервалах.
Результаты. В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии. Применение в составе методики модуля оптимизации на основе алгоритма роя частиц обеспечивает надежное и точное определение экстремума целевой функции, что, в свою очередь, обеспечивает повышение эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии.
Выводы. Методика апробирована на практических примерах оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем различных конфигураций и доказала свою эффективность. Методика реализована в виде программного приложения, что обеспечивает удобство ее практического применения. Полученные результаты могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием и эксплуатацией электроэнергетических систем с использованием генерирующих установок возобновляемой энергетики.

Ключевые слова: гибридные электроэнергетические системы, возобновляемые источники энергии, оптимизация состава оборудования, алгоритм роя частиц

© Обухов С.Г., Климова Г.Н., Ибрагим А., 2020
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 6, с. 25–38.

Sergey Gennadyevich Obukhov
National Research Tomsk Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Electric Power and Electrical Engineering Department of School of Energy & Power Engineering, Russia, Tomsk, e-mail: serob@tpu.ru

Galina Nikolaevna Klimova
National Research Tomsk Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Power and Electrical Engineering Department of School of Energy & Power Engineering, Russia, Tomsk, e-mail: gariki@tpu.ru

Ahmed Ibrahim
National Research Tomsk Polytechnic University, Postgraduate student of the Electric Power and Electrical Engineering Department of School of Energy & Power Engineering, Russia, Tomsk, e-mail: ibragim @tpu.ru

Methodology of optimum unit commitment of energy systems with renewable energy sources

Abstract

Background. One of the promising ways to improve the reliability and efficiency of power supply for customers in the areas remote from central electrical grid is the use of hybrid power systems with renewable energy sources. The primary task of designing such systems is the unit commitment of the generating equipment that provides the optimal technical and economic indexes of the electric power system. The stochastic nature of generation and nonlinearity of the characteristics of power plants cause a high complexity of solving this problem, which, from a mathematical point of view, is formulated as an optimization problem. An accurate and reliable solution of this optimization problem increases the efficiency of design and operation of hybrid electric power systems with renewable energy sources. And it is a vital task of modern power industry.
Materials and methods. A probabilistic-statistical methods and models for the analysis of experimental data are used to construct climatic time series and graphs of electrical loads. In addition, to study the operating modes of the electric power system the MatLab system is used for the simulation and modeling, and an evolutionary particle swarm algorithm is used to solve the optimization problem. The original model of solar radiation is used as a part of this methodology. This model provides forecasting the key characteristics of solar radiation in any geographical point of Russia including the areas that have no results of routine actinometric observation. Weibull distribution function is used to forecast daily variations of wind speed. It enhances the validity of forecasting of electricity generation of wind-driven power plant at daily time interval.
Results. As a result of the research, a method of optimum unit commitment has been developed for the equipment of electric power systems based on renewable energy sources. The use of the particle swarm algorithm as a part of the methodology provides reliable and accurate determination of the extremum of the objective function, which increases the efficiency of design and operation of hybrid electric power systems with renewable energy sources.
Conclusions. The method has been tested on practical examples of optimum unit commitment for the equipment of electric power systems of various configurations and has proven its effectiveness. The technique is implemented as a software application, which ensures the convenience of its practical application.
The obtained results can be used by companies involved in the design and operation of electric power systems using renewable energy generating units.

Key words: hybrid power system, renewable energy sources, optimum unit commitment, particle swarm algorithm

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.025-038

Введение. Одним из приоритетных направлений развития современной энергетики является активное внедрение экологически чистых технологий производства электрической энергии. К таким технологиям относятся гибридные системы электроснабжения (ГСЭС) с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Наиболее перспективная область практического применения ГСЭС – системы электроснабжения потребителей небольшой мощности, территориально расположенные в труднодоступных районах, удаленных от центральной электрической сети. По оценкам Минэнерго РФ, ГСЭС могут быть востребованы более чем в 100 тыс. небольших изолированных поселениях по всей территории России, в том числе в ряде районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, в которых географически, технически и экономически невозможно организовать централизованное энергоснабжение [1].

Первоочередная задача проектирования ГСЭС – выбор состава основного генерирующего оборудования, обеспечивающего оптимальные технико-экономические показатели проектируемой энергетической системы. Высокая степень сложности решения данной задачи обусловлена стохастическим характером генерации и нелинейностью характеристик энергетических установок на основе ВИЭ. В общем случае в составе ГСЭС могут использоваться разные типы генерирующих источников, но преимущественно применяются: фотоэлектрические (ФЭУ) и ветроэнергетические (ВЭУ) установки, накопители энергии на основе аккумуляторных батарей (АБ) и/или топливных элементов (ТЭ), а в качестве гарантированного источника питания дизель-генераторные установки (ДГ).

Решению задач оптимизации состава оборудования ГСЭС с ВИЭ в последнее время посвящено большое количество научных работ, авторы которых используют разнообразные критерии и алгоритмы оптимизации. В качестве технических критериев чаще всего используются: вероятность потери питания (loss of power supply probability – LPSP), вероятность потери нагрузки (loss of load probability – LLS), недоотпуск электроэнергии потребителю (expected energy not supplied – EENS). В качестве экономических критериев наибольшее распространение получили: стоимость жизненного цикла (life cycle cost – LCC), выровненная стоимость электроэнергии (levelized cost of energy – LCOE), чистая текущая стоимость (net present cost – NPC). В большинстве случаев технические критерии используются в качестве ограничений по надежности проектируемых энергетических систем, а экономические критерии применяются в качестве критериев целевой функции оптимизации.

Например, авторы работ [2, 3] используют LPSP и LCC критерии для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ систем, предназначенных для электроснабжения автономных потребителей в отдаленных районах Ирана. LPSP и NPC критерии применяют для оптимизации ФЭУ/ВЭУ/ТЭ системы, расположенной в юго-восточном регионе Мексики [4]. Экономические критерии LCOE и NPC используются для выбора оптимального состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ систем при электрификации сельских поселений в трех автономных округах Колумбии [5] и деревни в Бенине (Африка) [6]. Для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ системы в районе Альмора (Индия) применяют LLS и EENS критерии [7], в [8] выбор состава оборудования ФЭУ/ВЭУ системы с гидроаккумулирующей электростанцией в провинции Сычуань (Китай) выполнен с помощью LCOE и LPSP критериев. Эти же критерии использовались для оптимизации ФЭУ/ВЭУ/АБ/ТЭ системы в районе города Шираз на юге Ирана [9], критерий LCC заложен в основу оптимизации ФЭУ/ВЭУ/ТЭ/ДГ системы в районе города Рафсанджан (Иран) [10]. Для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ системы в районе города Дахран (Саудовская Аравия) применяют LCC критерий совместно с EENS критерием [11]. Для повышения достоверности полученных результатов некоторые авторы применяют многоцелевую оптимизацию, используя в качестве дополнительных критериев экологические и социально-политические факторы: выбросы CO_2, площадь отчуждения земли, уровень автономности, стоимость топлива и др. [12–15].

Большим разнообразием характеризуются и применяемые алгоритмы оптимизации состава оборудования ГСЭС, подробный обзор которых приведен в [16, 17]. В последние годы для оптимизации ГСЭС все чаще апробируются эволюционные алгоритмы, из которых наибольшее распространение получили генетические алгоритмы [4, 9, 18], алгоритм поиска кукушки [7, 18] и алгоритм роя частиц (particle swarm optimization – PSO) [2, 8, 13, 14]. Распространение получают и сравнительно новые виды эволюционных алгоритмов: имитации отжига [10], молниеносного поиска [11], преподавания и обучения [12] и другие [3].

Упростить решение задачи оптимизации состава оборудования ГСЭС позволяет применение специализированного программного обеспечения, из которого наиболее распространенными являются программные комплексы HOMER, HOGA, HYBRID2 и некоторые другие [16]. Программные комплексы помогают выполнить сравнительный анализ ГСЭС различных конфигураций, содержат обширную базу технико-экономических характеристик энергетического оборудования, используют современные алгоритмы оптимизации. Подробный обзор прикладного программного обеспечения для моделирования режимов и

оптимизации состава оборудования ГСЭС сделан в [19], примеры практического применения программных комплексов для оптимизации ГСЭС различных конфигураций приведены в [5, 6, 16]. Следует отметить, что практическое применение данных программных продуктов в России ограничивается их стоимостью и плохой адаптацией к вводу исходных данных временных рядов скоростей ветра и солнечной радиации для большинства регионов России. Связано это с небольшим количеством метеостанций на территории нашей страны [20].

Проведенный обзор современных научных работ, посвященных оптимизации состава оборудования ГСЭС с ВИЭ показал, что основными проблемами, на которых сосредоточены усилия ученых, являются достоверное прогнозирование мощности, генерируемой установками возобновляемой энергетики, и выбор алгоритма решения оптимизационной задачи, обеспечивающего надежное определение экстремума целевой функции при заданных ограничениях. Применение разнообразных приемов и способов решения данной задачи свидетельствует о том, что на сегодняшний день научная проблема оптимизации состава оборудования ГСЭС является актуальной и не имеет законченного решения.

Цель нашего исследования состояла в повышении эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Для достижения поставленной цели решается задача разработки методики оптимизации состава оборудования ГСЭС в целях ее применения при проектировании изолированных электроэнергетических систем, территориально расположенных в любом регионе России.

Методы исследования. В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования ГСЭС с ВИЭ, упрощенная блок-схема которой показана на рис. 1.

Оптимизация состава оборудования ГСЭС с ВИЭ выполняется за три последовательных этапа. На первом этапе расчетов формируются временные ряды климатических данных (солнечной радиации, скорости ветра и температуры воздуха) и график электрических нагрузок потребителя электроэнергии. Основой формирования временных климатических рядов являются географические координаты размещения ГСЭС и данные многолетних метеорологических наблюдений. Построение графиков электрических нагрузок осуществляется с использованием вероятностно-статистической модели электрических нагрузок децентрализованного потребителя [21]. Исходными данными для выполнения первого этапа программы являются данные метеорологических сайтов и базы данных Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) [22]. В [22] используются временные ряды продолжительностью в один год с дискретизацией в один час, которые преимущественно применяются для решения задач оптимизации ГСЭС.

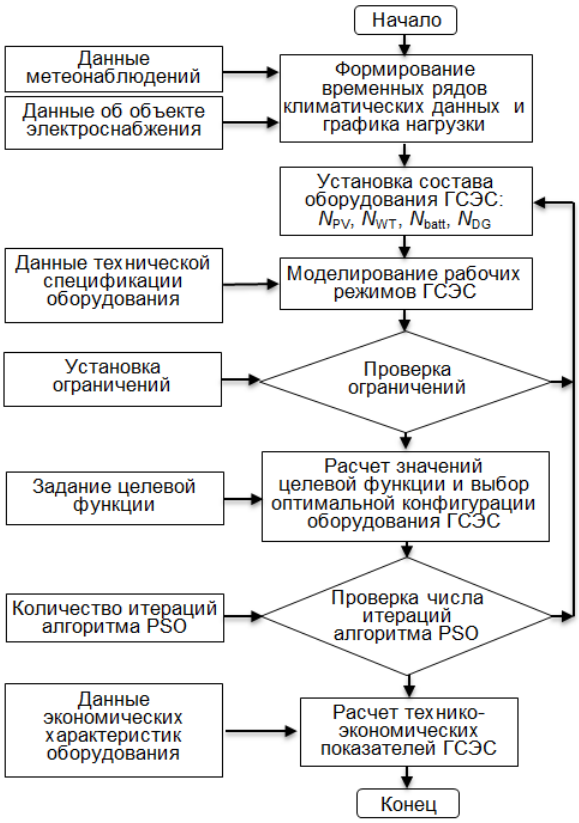


Рис. 1. Блок-схема методики оптимизации состава оборудования гибридных электроэнергетических систем

На втором этапе расчетов выполняется моделирование рабочих режимов ГСЭС, в результате которого определяются технические показатели проектируемой электроэнергетической системы. Имитационная модель ГСЭС с ВИЭ реализуется в программном комплексе MatLab/Simulink. Исходными данными для выполнения этого этапа расчетов служат основные технические характеристики энергетического обо-

рудования ГСЭС, установленные по данным их технической спецификации.

Оптимизация состава оборудования ГСЭС выполняется на заключительном третьем этапе расчетов. Оптимизационная задача решается с использованием специализированного программного модуля, реализованного в виде библиотеки программ-функций MatLab. Программный модуль построен на основе алгоритма PSO, широко распространенного при решении задач оптимизации ГСЭС. Результаты сравнения алгоритма PSO с другими видами алгоритмов при решении задач оптимизации состава оборудования ГСЭС доказывают его высокую производительность [3, 4, 9, 23], а также надежное функционирование при использовании различных целевых функций и ограничений [24]. Исходными данными для выполнения этого этапа расчетов являются экономические характеристики оборудования и заданные критерии оптимизации и ограничения.

Формирование временных рядов. Временной ряд солнечной радиации $G(t)$ строится с помощью комбинированной модели, в которой расчет одной части параметров производится по аналитическим выражениям, а другая часть параметров определяется с использованием эмпирических коэффициентов, полученных из базы данных NASA SSE [25] для заданной в расчетах географической точки размещения солнечной батареи (СБ). Данная модель солнечной радиации подробно описана в [22]. Ее особенностью является использование в качестве исходных данных численных значений индекса прозрачности атмосферы и альбедо поверхности, полученных из базы данных NASA SSE. Это позволяет применять модель для прогнозирования основных характеристик солнечного излучения в любой географической точке, в том числе и для территорий, по которым отсутствуют результаты регулярных актинометрических наблюдений.

Экспериментальные данные наблюдений о скорости ветра $V(t)$ аппроксимируются стандартной функцией распределения Вейбулла:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}, \qquad (1)$$

где c – параметр масштаба; k – параметр формы; $F(V)$ – функция интегральной повторяемости скорости ветра, которая характеризует долю времени (вероятности того, что скорость ветра равна или ниже, чем V).

С помощью известных методов статистической обработки экспериментальных данных рассчитываются значения коэффициентов c и k для каждого месяца года [26], и на их основе формируется временной ряд скоростей ветра для необходимого интервала времени согласно распределению

$$V(t) = c\left[-\ln\left(1 - F(V)\right)\right]^{\frac{1}{k}}. \qquad (2)$$

Результаты предварительно проведенных исследований показали, что функция обратного распределения Вейбулла (2) значительно повышает достоверность прогнозирования выработки электроэнергии ВЭУ на суточных интервалах времени.

Временной ряд температуры воздуха $T(t)$ строится на основе математической модели, учитывающей суточный ход температуры [27]:

$$T(t) = \bar{T} + 0{,}5\Delta T \cdot \cos\left[2\pi\left(t_{loc} - t_{\max}\right)/t_{per}\right], \qquad (3)$$

где $\bar{T}$ – среднесуточная температура воздуха; ΔT – суточная амплитуда температуры воздуха; t_{per} – период изменения температуры воздуха; $t_{\max}$ – местное время максимума температуры; t_{loc} – локальное (местное) солнечное время.

Временной ряд графика электрических нагрузок формируется на основе вероятностно-статистической модели, позволяющей получить детальный прогноз режимов потребления электрической энергии для конкретного объекта электроснабжения со специфическими для него особенностями [21]:

$$P_{load}(t) = \bar{P}_{ik}\, k_{Sk} \pm \beta \cdot \sigma(P_{ik}), \qquad (4)$$

где $P_{load}(t)$ – расчетная активная электрическая нагрузка; $\bar{P}_{ik}$ – математическое ожидание активной нагрузки i-го часа k-го сезона (определяется по статистическим графикам); k_{Sk} – коэффициент сезонности; $\sigma(P_{ik})$ – среднее квадратичное отклонение; β – коэффициент надежности расчета (при вероятности 0,975 β = 2).

Моделирование режимов. Для моделирования режимов ГСЭС с ВИЭ используются упрощенные «энергетические» модели компонентов, однозначно связывающие их выходные энергетические характеристики с внешними факторами и входными воздействиями. Предлагаемая методика позволяет оптимизировать со-

став оборудования ГСЭС произвольной конфигурации, однако в качестве объекта исследований рассматривается ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ система, в связи с чем приводится описание математических моделей только этих компонентов.

Математическая модель СБ, оснащенной контроллером максимальной мощности, описывается следующим уравнением [27]:

$$P_{PV} = C_{FF}\, N_{FM}\, \eta_{conv}\, G \ln(10^6 \cdot G) / T_{FM}, \qquad (5)$$

где N_{FM} – число фотоэлектрических модулей (ФМ) в СБ; C_{FF} – постоянный коэффициент СБ; η_{conv} – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности; G – текущий уровень солнечной радиации; T_{FM} – текущая температура ФМ.

Численные значения коэффициента C_{FF} определяются по уравнению

$$C_{FF} = \frac{FF \cdot T_{ref}}{G_{ref}} \times \frac{\left[I_{SC} + k_I (T_{FM} - T_{ref})\right]\left[V_{OC} + k_V (T_{FM} - T_{ref})\right]}{\ln(10^6 \cdot G_{ref})}, \qquad (6)$$

где FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФМ; T_{ref}, G_{ref} – значения температуры и освещенности ФМ при стандартных условиях; k_I, k_V – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ соответственно.

Коэффициент заполнения ВАХ ФМ определяется по данным их технической спецификации:

$$FF = I_{MPP} V_{MPP} / I_{SC} V_{OC}, \qquad (7)$$

где I_{MPP}, V_{MPP} – паспортные значения тока и напряжения ФМ в точке максимальной мощности; I_{SC}, V_{OC} – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ при стандартных условиях тестирования.

Для моделирования выходной электрической мощности ВЭУ применяется математическая модель, построенная на основе «кубической» аппроксимации ее рабочей характеристики [8, 28]:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & V < V_{in}, \\ \left(\dfrac{V^3 - V_{in}^3}{V_{rat}^3 - V_{in}^3}\right) \cdot P_{WTrat} & V_{in} < V < V_{rat}, \\ P_{WTrat} & V_{rat} < V < V_{up}, \\ 0 & V > V_{up}, \end{cases} \qquad (8)$$

где P_{WTrat} – номинальная мощность ВЭУ; V – скорость ветра; V_{in} – стартовая скорость ветра; V_{up} – предельная скорость ветра; V_{rat} – номинальная скорость ветра.

Математическая модель аккумуляторной батареи описывает два ее возможных состояния: фазу заряда и фазу разряда. В фазе заряда АБ уровень заряда (state of charge – SOC) определяется по уравнению [28]

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t)\,(1 - \sigma) + \left[P_{PV}(t)\,\eta_{PV} + P_{WT}(t)\,\eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}}\right]\eta_{ch}\,\Delta t. \qquad (9)$$

В фазе разряда АБ уровень остаточного заряда определяется следующим образом:

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t)\,(1 - \sigma) + \left[P_{PV}(t)\,\eta_{PV} + P_{WT}(t)\,\eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}}\right]\frac{1}{\eta_{dis}}\,\Delta t, \qquad (10)$$

где σ – скорость саморазряда батареи за время Δt; η_{PV}, η_{WT}, η_{inv} – коэффициенты полезного действия преобразователей ФЭУ, ВЭУ и выходного инвертора соответственно; η_{ch}, η_{dis} – эффективность батареи во время фазы заряда и разряда соответственно.

В условиях эксплуатации АБ величина SOC ограничена нижним $SOC_{\min}$ и верхним $SOC_{\max}$ пределами, которые определяют минимальное и максимальное значения уровня заряда АБ:

$$SOC_{\min} \le SOC(t) \le SOC_{\max}. \qquad (11)$$

Максимальное значение $SOC_{\max}$, как правило, соответствует номинальной емкости АБ, нижний предел $SOC_{\min}$ определяется максимально допустимой глубиной разряда батареи (depth of discharge – DOD), который зависит от типа АБ и определяет срок службы устройств хранения энергии:

$$SOC_{\min} = (1 - DOD)\, SOC_{\max}. \qquad (12)$$

Моделирование режимов АБ производится с учетом ограничения по максимальному зарядному току (или максимальной зарядной мощности $P_{ch.\max}$), допустимое значение которого определяется по технической спецификации конкретной модели АБ.

ДГ в составе изолированных энергетических систем вынуждены работать на резко переменную нагрузку, что обуслов-

ливает изменение в широком диапазоне величины удельного расхода топлива. Для определения удельного расхода топлива при частичных загрузках ДГ используется следующее эмпирическое выражение [29]:

$$g = g_{rat}\,\frac{a + b\,k_{DG}}{c\,k_{DG} + 10^{-6}}, \qquad (13)$$

где g_{rat} – удельный расход топлива при номинальной нагрузке; a, b, c – постоянные коэффициенты, численные значения которых приняты в соответствии с рекомендациями [29]; k_{DG} – коэффициент загрузки ДГ.

Оптимизационная задача. Разработанная методика позволяет использовать в качестве аргументов целевой функции различные критерии оптимизации, в том числе и несколько критериев одновременно. В качестве критерия оптимизации принята выровненная стоимость электроэнергии *LCOE*, которая определяется по уравнению

$$LCOE = \frac{LCC}{E_{year}}, \qquad (14)$$

где *LCC* – приведенная стоимость жизненного цикла; E_{year} – годовой объем электроэнергии, полученный потребителем от ГСЭС с ВИЭ.

Стоимость жизненного цикла, или общие затраты на электроэнергетическую систему в течение всего ее срока службы, определяются по уравнению

$$LCC = Cap + Main, \qquad (15)$$

где *Cap* – общие капитальные затраты на проект; *Main* – стоимость технического обслуживания.

Фактор времени при распределении капитальных затрат в течение всего жизненного цикла объекта учитывается с помощью коэффициента возврата капитала (capital recovery factor – *CRF*):

$$CRF = \frac{i\,(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}, \qquad (16)$$

где i – процентная банковская ставка; T – общий срок службы энергетической системы.

Сроки службы отдельных компонентов ГСЭС могут значительно различаться, поэтому их необходимо привести к условиям единовременного платежа. Например, если в составе ГСЭС используется АБ с гарантированным сроком службы 5 лет, а значение жизненного цикла системы принято равным T = 20 лет, приведенная стоимость АБ C_{batt} определяется по следующему выражению:

$$C_{batt} = C_{batt0}\left(1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}}\right), \qquad (17)$$

где C_{batt0} – первоначальная цена АБ.

Срок службы дизель-генераторных установок измеряется количеством моточасов до капитального ремонта, поэтому их приведенная стоимость рассчитывается по аналогичной (17) формуле после определения их срока службы по уравнению

$$T_{DG} = \frac{H_{OV}}{H_F}, \qquad (18)$$

где H_F – количество часов работы ДГ в год, рассчитанное по результатам моделирования; H_{OV} – количество моточасов до капитального ремонта, заявленное производителем ДГ.

Для ГСЭС в конфигурации ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ суммарные приведенные капитальные затраты определяются по уравнению

$$Cap = CRF\begin{pmatrix} N_{WT}\,C_{WT} + N_{PV}\,C_{PV} + \\ +N_{batt}\,C_{batt} + C_{DG} + C_{inv} \end{pmatrix}, \qquad (19)$$

где N_{WT}, C_{WT} – количество и стоимость ВЭУ соответственно; N_{PV}, C_{PV} – количество и стоимость ФМ; N_{batt}, C_{batt} – количество и приведенная стоимость АБ; C_{DG} – приведенная стоимость ДГ; C_{inv} – приведенная стоимость инвертора.

Пренебрегая затратами на обслуживание инвертора, суммарные затраты на техническое обслуживание ГСЭС определяются по уравнению

$$\begin{aligned} Main = {} & N_{WT}\,M_{WT} + N_{PV}\,M_{PV} + \\ & +N_{batt}\,M_{batt} + M_{DG} + M_{fuel}, \end{aligned} \qquad (20)$$

где M_{WT}, M_{PV}, M_{batt}, M_{DG} – ежегодные затраты на техническое обслуживание ВЭУ, ФЭУ, АБ и ДГ; M_{fuel} – затраты на дизельное топливо, расход которого определяется по результатам моделирования режимов.

Искомыми переменными оптимизационной задачи являются: количество ФМ в СБ N_{PV}; количество ветроэнергетических установок N_{WT}; число аккумуляторов в аккумуляторной батарее N_{batt}, при которых обеспечивается минимальное значение *LCOE*. В зависимости от рассматриваемой конфигурации ГСЭС для искомых переменных могут быть установлены дополнительные ограничения.

Для конфигурации ГСЭС с ДГ минимальное количество энергетического оборудования принимается равным нулю, для ГСЭС без гарантированного источника питания минимальная емкость АБ $Q_{batt.\min}$ (кВт·ч) определяется с учетом требований к автономности, которая выражается в числе часов питания T_{batt} потребителей от АБ при отсутствии генерации от возобновляемых источников, допустимой глубины разряда *DOD* батарей, общей эффективности системы хранения энергии:

$$Q_{batt.\min} \geq \frac{E_L T_{batt}}{24 \cdot DOD\ \eta_{ch}\ \eta_{inv}}, \qquad (21)$$

где E_L – значение среднесуточной величины энергии, потребляемой нагрузкой в месяц года с самым высоким значением коэффициента сезонности k_{Sk}.

Алгоритм роя частиц. Алгоритм PSO был разработан Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом в 1995 году и представляет собой метод оптимизации нелинейных функций, основанный на природном поведении стай птиц [30]. Идея алгоритма заключается в непрерывном перемещении частиц в возможном пространстве решений, при этом текущее состояние частицы характеризуется двумя переменными: координатой x_i^k и скоростью перемещения v_i^k. В процессе расчета направление и вектор скорости каждой из частиц изменяются в соответствии со сведениями о найденных на предыдущей итерации оптимумах: $Ppbest_i$ – оптимальное значение целевой функции из всех точек, в которых побывала данная частица; *Pgbest* – оптимальное значение целевой функции, найденное всеми частицами.

В практических приложениях чаще применяется модифицированный алгоритм, предложенный Юхи Ши и Расселом Эберхартом [31], в котором, в отличие от классического, используется дополнительный коэффициент инерции *w*, который определяет градиент изменения скорости частиц. Модифицированный алгоритм PSO описывается следующей системой уравнений:

$$v_i^{k+1} = v_i^k w + c_1 r_1 \left[Ppbest_i - x_i^k \right] + \\ + c_2 r_2 \left[Pgbest - x_i^k \right], \qquad (22)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^k; \ \ i = 1, 2, .., N; \quad k = 1, 2, .., k_{\max},$$

где c_1, c_2 – константы ускорения; r_1, r_2 – случайные функции в диапазоне [0,1]; *i* – порядковый номер частицы; *k* – значение текущей итерации; *N* – число частиц; $k_{\max}$ – максимальное число итераций.

Нами используются численные значения и законы изменения коэффициентов инерции и ускорения, определенные в [32]. Число частиц и максимальное число итераций выбираются в соответствии с размерностью решаемой задачи. Предварительно проведенные вычислительные эксперименты показали, что для рассматриваемого ниже примера рациональными значениями являются: $N = 80$; $k_{\max} = 100$.

Результаты исследования. Апробация разработанной методики выполнена на практическом примере выбора оптимального состава оборудования ГСЭС, территориально расположенной в районе г. Владивосток (43º 6’ с.ш., 135º 42’ в.д.) и предназначенной для электроснабжения изолированного потребителя с зимним максимумом нагрузки 10 кВт. Выбор данного района размещения ГСЭС обоснован тем, что данный российский регион характеризуется относительно высокими значениями энергетического потенциала ветра и солнечного излучения, что определяет хорошие перспективы применения установок ВИЭ. Для обеспечения необходимого уровня надежности проектируемая ГСЭС должна иметь в своем составе гарантированный источник питания, задача исследований заключалась в сравнительном анализе возможных конфигураций построения электроэнергетической системы с применением установок ВИЭ.

Интегральные показатели временных рядов данных, полученные по результатам статистической обработки данных многолетних метеонаблюдений, приведены в табл. 1, сформированные на их основе временные ряды показаны на рис. 2.

Для построения временного ряда солнечной радиации использовались данные NASA [25] за 22-летний период наблюдений, временные ряды скорости ветра и температуры воздуха построены по данным сайта «Расписание погоды»[3] за 15-летний период наблюдений по метеостанции № 31960. График нагрузок построен на основе типового графика элек-

[3] Сайт «Расписание погоды». – https://rp5.ru/ ((дата обращения: 20.06.2020).

трических нагрузок коммунально-бытового потребителя.

Основные технико-экономические характеристики генерирующего оборудования проектируемой ГСЭС представлены в табл. 2. Технические характеристики оборудования определены по данным их технической спецификации, экономические показатели установлены по данным [3, 5, 10]. Для перевода стоимости оборудования в отечественную валюту использовался курс 70 руб/$.

Таблица 1. **Интегральные показатели временных рядов данных**

Показатель		Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
Индекс прозрачности		0,64	0,66	0,6	0,52	0,48	0,46	0,41	0,44	0,52	0,56	0,56	0,6
Альбедо поверхности		0,19	0,21	0,16	0,12	0,12	0,16	0,14	0,14	0,13	0,11	0,12	0,16
Средняя скорость ветра, м/с		6,1	5,8	5,7	5,8	5,7	5,4	5,3	5,2	4,9	5,6	6	6
Параметры распределения Вейбулла	*c*	6,186	5,462	5,807	5,911	9,033	5,482	5,734	4,451	5,154	5,849	6,122	6,012
	k	1,913	1,533	1,691	1,717	1,791	1,825	1,647	1,739	1,731	1,75	1,775	1,756
Средняя температура, ºС		–12,2	–8,5	–1,9	4,9	9,8	14,0	18,3	20,8	16,4	9,4	–0,3	–9,9
Суточная амплитуда температуры, ºС		7,1	7,2	6,6	7,5	8	6,7	5,7	5,6	6,7	7	6,1	6,6
Коэффициент сезонности нагрузки		1	1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	1

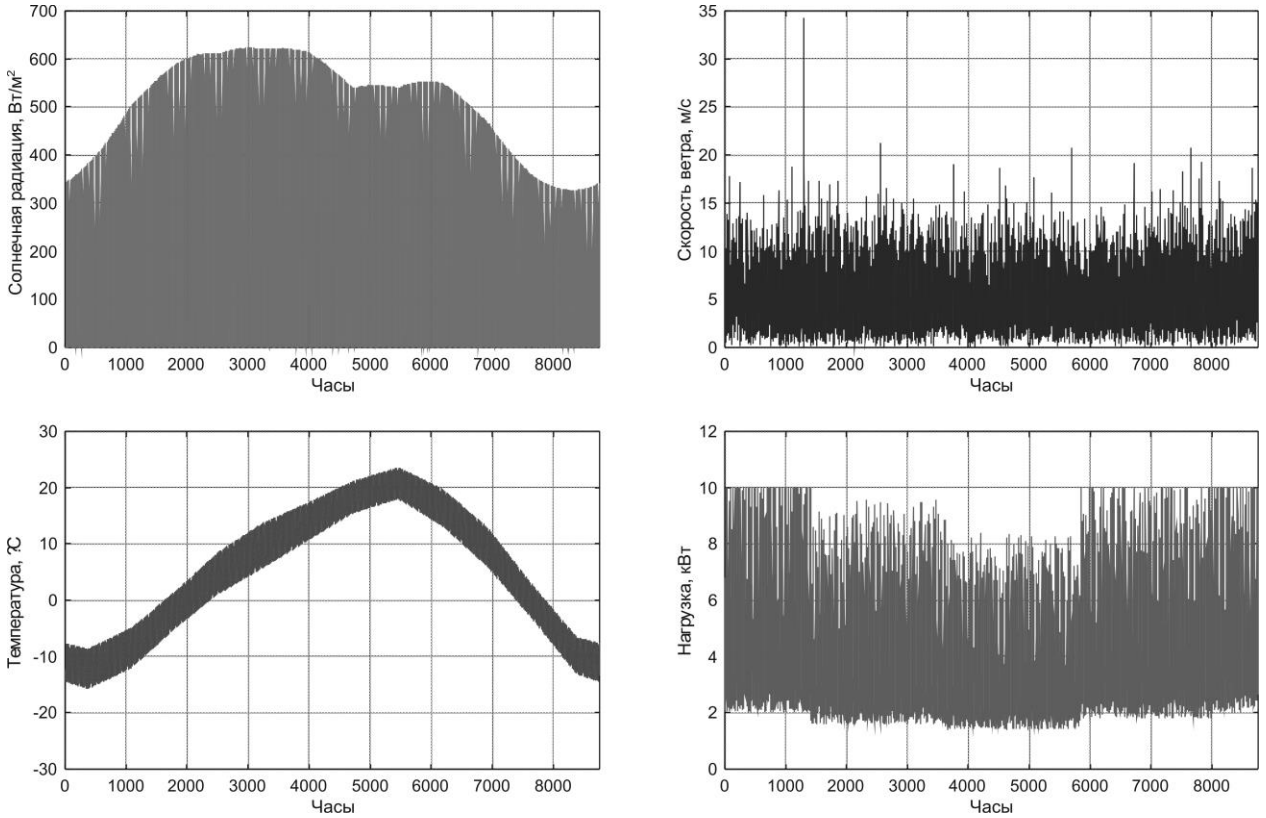


Рис. 2. Временные ряды климатических данных и график нагрузки потребителя

Таблица 2. **Основные технико-экономические характеристики генерирующего оборудования**

Показатель	Оборудование				
	ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB	ВЭУ Aeolos H2KW	АБ HOPPECKE 8OPzS 800	ДГ Perkins 403D-15G	инверторы Victron Phoenix3000
Номинальная мощность (емкость)	320 Вт	2 кВт	1,6 кВт·ч	12 кВт	12 кВт
Капитальные затраты, тыс. руб.	56	294	25,2	700	602
Затраты на обслуживание, тыс. руб.	0,56	11,9	0,25	23,1 руб/ч	0
Срок службы	20 лет	20 лет	5 лет	15000 час	10 лет

Экономические характеристики генерирующего оборудования, приведенные в табл. 2, включают затраты на монтажные и пусконаладочные работы, а также соответствующие преобразователи для ФЭУ, ВЭУ и АБ. Процентная ставка в расчетах принята равной i = 7 %, срок жизненного цикла системы составляет T = 20 лет. Солнечная батарея установлена под углом 43º к поверхности и ориентирована на юг, абсолютный расход дизельного топлива ДГ при номинальной нагрузке составляет 3,67 литра, допустимая глубина разряда АБ принята равной 70 %, максимальная зарядная мощность $P_{ch.\max} = 0{,}2 \cdot SOC_{\max}$.

Для проектируемой ГСЭС с ВИЭ выбрана смешанная архитектура построения с двумя сборными шинами постоянного (DC) и переменного (AC) тока, получившая наибольшее распространение для построения электроэнергетических систем небольшой мощности [33] (рис. 3).

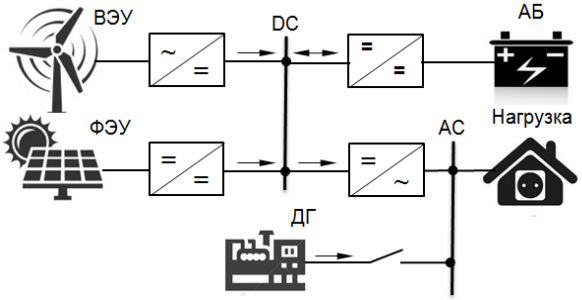


Рис. 3. Схема построения гибридной электроэнергетической системы

При таком построении ГСЭС генерирующие установки ВИЭ подключаются через индивидуальные преобразователи к шине DC, на которой производится регулирование баланса мощности. Шина AC используется для подключения к ней нагрузки и ДГ. Если в АБ имеется достаточный запас энергии, нагрузка получает питание от ФЭУ и ВЭУ через автономный инвертор напряжения. При снижении остаточной емкости АБ ниже установленного предела система управления формирует управляющий сигнал на включение ДГ, который обеспечивает электроснабжение потребителей, а АБ в этом режиме заряжается от установок ВИЭ.

Важным достоинством ГСЭС с ВИЭ является экономия дизельного топлива, стоимость которого с учетом доставки в отдаленные, труднодоступные районы может быть очень высокой. Стоимость дизельного топлива была принята равной 46,9 руб/л.

В табл. 3 представлены результаты решения задачи оптимизации состава оборудования ГСЭС различных конфигураций.

Таблица 3. **Оптимальный состав оборудования ГСЭС в различных конфигурациях**

Конфигурация ГСЭС	Количество единиц оборудования				*LCOE*, руб/кВт·ч
	N_{PV}	N_{WT}	N_{batt}	N_{DG}	
ДГ	0	0	0	1	41,4
ДГ-ФЭУ-АБ	86	0	73	1	37,7
ДГ-ВЭУ-АБ	0	14	40	1	36,1
ДГ-ФЭУ-ВЭУ-АБ	39	8	38	1	31,9

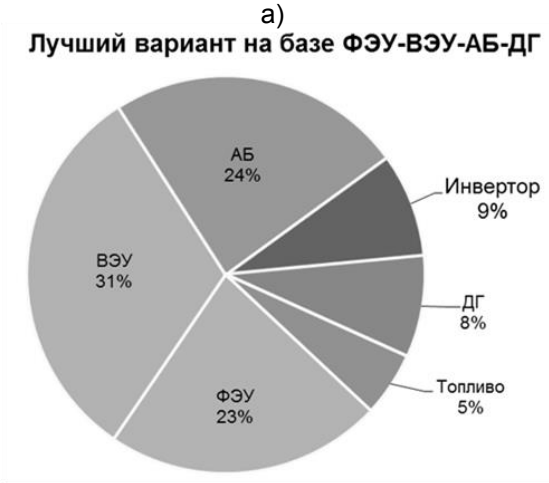
В базовом варианте построения ГСЭС на основе одного рабочего ДГ суммарный расход топлива составляет 13990 литров при годовом объеме потребляемой энергии 31690 кВт·ч. Включение в состав ГСЭС установок ВИЭ обеспечивает значительное снижение моточасов работы ДГ, чем достигается сохранение их эксплуатационного ресурса и экономия дизельного топлива.

Результаты проведенных исследований показывают, что при принятых технико-экономических характеристиках генерирующего оборудования минимальная выровненная себестоимость электроэнергии соответствует конфигурации с одновременным применением ФЭУ и ВЭУ. Расчетное годовое число моточасов ДГ в данной конфигурации составляет 742 часа при годовом расходе топлива 1123 литра. В сравнении с базовым вариантом ГСЭС, стоимость электроэнергии в такой электроэнергетической системе уменьшается практически в 1,3 раза. Сравнительные диаграммы затрат для базовой и предложенной конфигурации ГСЭС показаны на рис. 4.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что ГСЭС с ВИЭ являются конкурентоспособными наряду с традиционными системами электроснабжения изолированных потребителей, преимущественно базирующимися на базе дизель-генераторных установок. Объясняется это тем, что в рассматриваемом регионе обеспечивается относительно высокий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) установок возобновляемой энергетики: расчетные зна-

чения КИУМ составляют около 19 % для ВЭУ и 17 % для ФЭУ.

а)



б)

Рис. 4. Структура общих затрат на электроэнергетическую систему: а – базовый вариант на основе ДГ; б – вариант на базе ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ

Выводы. В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии, реализованная в виде программного приложения. Предлагаемая методика может быть использована для выбора оптимального состава оборудования ГСЭС различных конфигураций, территориально расположенных в любом регионе России, в том числе и в районах, для которых отсутствуют результаты актинометрических наблюдений. Входящий в состав методики модуль оптимизации на основе алгоритма роя частиц обеспечивает надежное и точное определение экстремума целевой функции, чем обеспечивается повышение эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии.

Список литературы

1. **Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю.** Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. – 2019. – Т. 2, вып. 2. – С. 111–120. doi: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120

2. **Askarzadeh A., Coelho L.S.** A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran // Solar Energy. – 2015. – Vol. 112. – P. 383–396. doi: 10.1016/j.solener.2014.12.013

3. **Maleki A., Pourfayaz F.** Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms // Solar Energy. – 2015. – Vol. 115. – P. 471–483. doi: 10.1016/j.solener.2015.03.004

4. **Techno-economical** optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico / V.M. Sanchez, A.U. Chavez-Ramirez, S.M. Duron-Torres, et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, No. 29. – P. 16646–16665. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.034

5. **Techno-economic** feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia / A.H. Mamaghani, S.A.A. Escandon, B. Najafi, et al. // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 97. – P. 293–305. doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086

6. **Odou O.D.T., Bhandari R., Adamou R.** Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 145. – P. 1266–1279. doi: 10.1016/j.renene.2019.06.032

7. **Sanajaoba S., Fernandez E.** Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 96. – P. 1–10. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.069

8. **Optimized** sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system / X. Xu, W. Hu, D. Cao, et al. // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 147, part 1. – P. 1418–1431. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.099

9. **Rouhani A.A., Kord H., Mehrabi M**. Comprehensive Method for Optimum Sizing of Hybrid Energy Systems using Intelligence Evolutionary Algorithms // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – Vol. 6, No. 6. – P. 4702–4712. doi: 10.17485/ijst/2013/v6i6/33924

10. **Maleki A.** Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2018. – Vol. 13, No. 2. – P. 140–147. doi: 10.1093/ijlct/cty006

11. **Hamanah W.M., Abido M.A., Alhems L.M.** Optimum Sizing of Hybrid PV, Wind, Battery and Diesel System Using Lightning Search Algorithm // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – Vol. 45. – P. 1871–1883. doi: 10.1007/s13369-019-04292-w

12. **Cho J.H., Chun M.G., Hong W.P.** Structure Optimization of Stand-Alone Renewable Power Systems Based on Multi Object Function // Energies. – 2016. – Vol. 9, No. 8. – P. 1–19. doi: 10.3390/en9080649

13. **Multi-Objective** Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER / J. Lu, W. Wang, Y. Zhang, S. Cheng // Energies. – 2017. – Vol. 10, No. 10. – P. 1–17. doi: 10.3390/en10101664

14. **Sharafi M., ELMekkawy T.Y.** Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach // Renewable Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 67–79. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.011

15. **Multi-objective** optimal design of hybrid renewable energy system under multiple scenarios / R. Wang, J. Xiong, M. He, et al. // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 151. – P. 226–237. doi: 10.1016/j.renene.2019.11.015

16. **Singh S., Singh M., Kaushik S.C.** A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems // International Journal of Green Energy. – 2016. – Vol. 13, No. 15. – P. 1564–1578. doi: 10.1080/15435075.2016.1207079

17. **Saharia B.J., Brahma H., Sarmah N.** A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2018. – Vol. 10(053502). – P. 1–33. doi: 10.1063/1.5032146

18. **Singh S.S., Fernandez E.** Modeling, size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system // Energy. – 2018. – Vol. 143. – P. 719–731. doi: 10.1016/j.energy.2017.11.053

19. **Sinha S., Chandel S.S.** Review of software tools for hybrid renewable energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 192–205. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.035

20. **Елистратов В.В.** Автономное энергоснабжение территорий России энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии // Энергетический вестник. – 2016. – № 21. – С. 42–49.

21. **Обухов С.Г., Хошнау З.П.** Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // Электрические станции. – 2012. – № 11. – С. 43–47.

22. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2017. – № 16–18. – С. 43–56. doi: 10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056

23. **Stand-alone** hybrid energy systems for remote area power generation / A. Razmjoo, R. Shirmohammadi, A. Davarpanah, et al. // Energy Reports. – 2019. – Vol. 5. – P. 231–241. doi: 10.1016/j.egyr.2019.01.010

24. **Phommixay S., Doumbia M.L., St‑Pierre D.L.** Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization // International Journal of Energy and Environmental Engineering. – 2020. – Vol. 11. – P. 73–89. doi: 10.1007/s40095-019-00332-1

25. **The NASA** Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. – https://power.larc.nasa.gov/#dataaccess – (Дата обращения: 20.06.2020).

26. **Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П.** Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011. – № 2. – С. 25–30.

27. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского поли-технического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 6. – С. 38–51.

28. **Eriksson E.L.V., Gray E.M.** Optimization of renewable hybrid energy systems – A multi-objective approach // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 133. – P. 971–999. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.053

29. **Optimization** of the Operation of Isolated Industrial Diesel Stations / C.F. Matt, L.S.R. Vieira, G.F.W. Soares, L.P.T. de Faria // 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO6). – Rio de Janeiro, 2005. – P. 1–8.

30. **Kennedy J., Eberhart R.** Particle swarm optimization // Proceedings International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968

31. **Shi Y., Eberhart R.** A modified particle swarm optimizer // IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. – 1998. – P. 69–73. doi: 10.1109/ICEC.1998.699146

32. **Optimal** performance of dynamic particle swarm optimization based maximum power trackers for stand-alone PV system under partial shading conditions / S. Obukhov, A. Ibrahim, A.A.Z. Diab, et al. // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 20770–20785. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966430

33. **Chauhan A., Saini R.P.** A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // Renewable and

Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 99–120. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.079

References

1. Lyukaytis, V.Yu., Glushkov, S.Yu. Avtonomnye energokompleksy, gibridnye konstruktsii s primeneniem vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Autonomous energy complexes, hybrid structures using renewable energy sources]. *Silovoe i energeticheskoe oborudovanie. Avtonomnye sistemy*, 2019, vol. 2, issue 2, pp. 111–120. (in Russ.) doi: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120

2. Askarzadeh, A., Coelho, L.S. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran. *Solar Energy*, 2015, vol. 112, pp. 383–396. doi: 10.1016/j.solener.2014.12.013

3. Maleki, A., Pourfayaz, F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*, 2015, vol. 115, pp. 471–483. doi: 10.1016/j.solener.2015.03.004

4. Sanchez, V.M., Chavez-Ramirez, A.U., Duron-Torres, S.M., Hernandez, J., Arriaga, L.G., Ramirez, J.M. Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, no. 29, pp. 16646–16665. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.034

5. Mamaghani, A.H., Escandon, S.A.A., Najafi, B., Shirazi, A., Rinald, F. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia. *Renewable Energy*, 2016, vol. 97, pp. 293–305. doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086

6. Odou, O.D.T., Bhandari, R., Adamou, R. Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin. *Renewable Energy*, 2020, vol. 145, pp. 1266–1279. doi: 10.1016/j.renene.2019.06.032

7. Sanajaoba, S., Fernandez, E. Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System. *Renewable Energy*, 2016, vol. 96, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.069

8. Xu, X., Hu, W., Cao, D., Huang, Q., Chen, C., Chen, Z. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system. *Renewable Energy*, 2020, vol. 147, part 1, pp. 1418–1431. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.099

9. Rouhani, A., Kord, H., Mehrabi, M. A Comprehensive Method for Optimum Sizing of Hybrid Energy Systems using Intelligence Evolutionary Algorithms. *Indian Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 4702–4712. doi: 10.17485/ijst/2013/v6i6/33924

10. Maleki, A. Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 140–147. doi: 10.1093/ijlct/cty006

11. Hamanah, W.M., Abido, M.A., Alhems, L.M. Optimum Sizing of Hybrid PV, Wind, Battery and Diesel System Using Lightning Search Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 1871–1883. doi: 10.1007/s13369-019-04292-w

12. Cho, J.H., Chun, M.G., Hong, W.P. Structure Optimization of Stand-Alone Renewable Power Systems Based on Multi Object Function. *Energies*, 2016, vol. 9, no. 8, pp. 1–19. doi: 10.3390/en9080649

13. Lu, J., Wang, W., Zhang, Y., Cheng, S. Multi-Objective Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 10, pp. 1–17. doi: 10.3390/en10101664

14. Sharafi, M. ELMekkawy, T.Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. *Renewable Energy*, 2014, vol. 68, pp. 67–79. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.011

15. Wang, R., Xiong, J., He, M., Gao, L., Wang, L. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy system under multiple scenarios. *Renewable Energy*, 2020, vol. 151, pp. 226–237. doi: 10.1016/j.renene.2019.11.015

16. Singh, S., Singh, M., Kaushik, S.C. A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems. *International Journal of Green Energy*, 2016, vol. 13, no. 15, pp. 1564–1578. doi: 10.1080/15435075.2016.1207079

17. Saharia, B.J., Brahma, H., Sarmah, N. A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018, vol. 10(053502), pp. 1–33. doi: 10.1063/1.5032146

18. Singh, S.S., Fernandez, E. Modeling, size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system. *Energy*, 2018, vol. 143, pp. 719–731. doi: 10.1016/j.energy.2017.11.053

19. Sinha, S., Chandel, S.S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32, pp. 192–205. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.035

20. Elistratov, V.V. Avtonomnoe energosnabzhenie territoriy Rossii energokompleksami na baze vozobnovlyaemyh istochnikov energii [Autonomous energy supply of Russian territories with energy complexes based on renewable energy sources]. *Energeticheskiy vestnik*, 2016, no. 21, pp. 42–49. (in Russ.)

21. Obukhov, S.G., Hoshnau, Z.P. Prognozirovanie rezhimov potrebleniya elektricheskoy energii avtonomnymi

energeticheskimi sistemami [Prediction of modes of electric energy consumption with autonomous energy systems]. *Elektricheskie stantsii*, 2012, no. 11, pp. 43–47. (in Russ.)

22. Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A. Matematicheskaya model' prikhoda solnechnoy radiatsii na proizvol'no-orientirovannuyu poverkhnost' dlya lyubogo regiona Rossii [Mathematical Model of Solar Radiation Incident on an Arbitrarily Oriented Surface for Any Region in Russia]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya (ISJAEE)*, 2017, no. 16–18, pp. 43–56. (In Russ.) doi: 10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056

23. Razmjoo, A., Shirmohammadi, R., Davarpanah, A., Pourfayaz, F., Aslani, A. Stand-alone hybrid energy systems for remote area power generation. *Energy Reports*, 2019, vol. 5, pp. 231–241. doi: 10.1016/j.egyr.2019.01.010

24. Phommixay, S., Doumbia, M.L., St‐Pierre, D.L. Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2020, vol. 11, pp. 73–89. doi: 10.1007/s40095-019-00332-1

25. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. – https://power.larc.nasa.gov/#dataaccess

26. Obukhov, S.G., Surkov, M.A., Khoshnau, Z.P. Metodika vybora vetroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti [Method for selecting low-power wind power plants]. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2011, no. 2, pp. 5–30. (in Russ.)

27. Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A. Imitatsionnaya model' rezhimov raboty avtonomnoy fotoelektricheskoy stantsii s uchetom real'nykh usloviy ekspluatatsii [Simulation model of operation of autonomus photovoltaic plant under actual operating condition]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. (in Russ.)

28. Eriksson, E.L.V., Gray, E.M. Optimization of renewable hybrid energy systems – A multi-objective approach. *Renewable Energy*, 2019, vol. 133, pp. 971–999. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.053

29. Matt, C.F., Vieira, L.S.R., Soares, G.F.W., de Faria, L.P.T. Optimization of the Operation of Isolated Industrial Diesel Stations. 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO6). Rio de Janeiro, 2005, pp. 1–8.

30. Kennedy, J., Eberhart, R. Particle swarm optimization. *Proceedings International Conference on Neural Networks*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968

31. Shi, Y., Eberhart, R. A modified particle swarm optimizer. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*, 1998, pp. 69–73. doi: 10.1109/ICEC.1998.699146

32. Obukhov, S., Ibrahim, A., Diab, A.A.Z., Al-Sumaiti, A.S., Aboelsaud, R. Optimal performance of dynamic particle swarm optimization based maximum power trackers for stand-alone PV system under partial shading conditions. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 20770–20785. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966430

33. Chauhan, A., Saini, R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 99–120. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.079

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.015.24

Анатолий Анатольевич Анисимов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорных систем, телефон (4932) 26-97-53,
e-mail: anis@eims.ispu.ru

Сергей Вячеславович Тарарыкин
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и микропроцессорных систем, телефон (4932) 26-96-96,
e-mail: tsv@ispu.ru

Синтез робастных систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами и наблюдателями состояния[1]

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время в системах автоматического управления мехатронными объектами применяются цифровые регуляторы с наблюдателями состояния, высокие потенциальные возможности которых обусловлены гибкостью структуры и развитыми методами синтеза. Вместе с тем при проектировании и практической реализации таких систем возникает проблема обеспечения робастности, связанная с параметрической неопределенностью типичных мехатронных объектов. Большинство методов синтеза робастных САУ основаны на применении непрерывных математических моделей и не учитывают специфики цифровой реализации регуляторов с наблюдателями состояния.
Материалы и методы. Использованы методы пространства состояния, модального управления, цифрового проектирования систем, алгоритмы численной оптимизации, имитационного моделирования в среде MatLab.
Результаты. Предлагается методика синтеза робастных цифровых систем модального управления с наблюдателями состояния, основанная на формировании динамических характеристик в пределах областей параметрической грубости. При этом низкая чувствительность САУ к вариациям параметров объекта управления обеспечивается за счет минимально-фазового характера передаточной функции комплексного регулятора, а низкая чувствительность к вариациям собственных параметров регулятора – за счет исключения положительных обратных связей как в контуре управления, так и в контуре подстройки.
Выводы. Разработанные рекомендации по выбору быстродействия контуров регулятора с наблюдателем состояния в пределах областей робастности, а также по формированию рациональной струк-

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части Государственного задания на 2020 г.
The project is carried out with financial support of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the basic part of Government Contract 2020.

© Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., 2020
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 6, с. 39–47

туры наблюдателя позволяют синтезировать цифровую САУ с низкой чувствительностью к вариациям как параметров объекта управления, так и собственных параметров регулятора.

Ключевые слова: автоматическое управление, регулятор состояния, наблюдатель состояния, управляемость, наблюдаемость, обратная связь по состоянию, отрицательная обратная связь, робастность, линейная система, матрицы, полиномы

Anatoly Anatolyevich Anisimov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Science, Associate Professor of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-53, e-mail: anis@eims.ispu.ru

Sergey Vyacheslavovich Tararykin
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Electronics and Microprocessor Systems, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-96, e-mail: tsv@ispu.ru

Synthesizing robust control systems for mechatronic objects with digital state controllers and observers

Abstract

Background. Currently, digital controllers with state observers are widely applied in automatic control systems for mechatronic objects, which great potential abilities are caused by structural flexibility and developed methods of synthesis. However, during design and practical implementation of the systems there is problem of robustness, associated with parametrical uncertainty of typical mechatronic objects. Most methods for synthesis of robust control systems are based on application of continuous mathematical models and do not take into account specific of digital realization of controllers with state observers.
Materials and methods. Methods of state space, modal control, digital system design, numerical optimization algorithms and simulation in MatLab environment were used.
Results. We propose a method of synthesizing robust digital modal control systems with state observers based on generating dynamic system characteristics within the areas of parametric robustness. Further, low sensitivity of the system to changes in controlled object parameters is ensured by the minimal phase character of the complex controller transfer function, while low sensitivity to changing parameters of the controller itself is ensured by excluding positive feedback in both control and adjustment circuits.
Conclusions. Developed recommendations of choosing dynamic characteristics of state controller with observer loops within robustness areas and of forming rational state observer structure allow us to synthesize digital automatic control system with low sensitivity for variation of both control object parameters and inherent controller parameters.

Key words: automatic control, state regulator, state observer, controllability, observability, state feedback, negative feedback, robustness, linear systems, matrices, polynomials

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.039-047

Введение. В условиях возрастания требований к качеству управления мехатронными объектами при ограниченных вычислительных ресурсах микропроцессорных систем, применяемых в режиме реального времени, становится актуальным применение методов синтеза цифровых регуляторов с наблюдателями состояния (РНС) по дискретным моделям [1, 2].

Ключевую роль в современной теории и практике автоматического управления играет проблема обеспечения робастности, т. е. сохранения устойчивости и приемлемого качества управления в условиях неопределенности параметров САУ [3–10]. Как было показано ранее, значительные возможности синтеза робастных систем содержатся в классическом модальном управлении, реализуемом на базе регуляторов состояния различного типа [1, 6, 9].

Применительно к системам с РНС было показано, что снижение чувствительности к вариациям параметров объекта управления достигается формированием такого распределения полюсов характеристического полинома, при котором сохраняется минимально-фазовый характер передаточной функции управляющего устройства [1, 2, 9].

При этом низкая чувствительность системы к вариациям собственных параметров РНС достигается путем выбора структуры и формирования темпа подстройки, при котором исключается появление положительных обратных связей как в основном контуре управления, так и в контуре подстройки наблюдателя [1, 2].

Вместе с тем разработка и исследование методов синтеза робастных систем с регуляторами состояния выполнялись в основном для непрерывных моделей мехатронных объектов. Всестороннее исследование эффективности подобных методов при синтезе цифровых систем управления с РНС для мехатронных объектов не проводилось.

Одной из особенностей цифровых методов синтеза САУ является неоднозначность перехода от непрерывной модели объекта управления к дискретной (Z-преобразования). При этом, в зависимости от применяемого метода преобразования, могут меняться свойства моделей объектов, в том числе характеристики управляемости и наблюдаемости, а следовательно, и параметрическая грубость синтезируемой системы [11–13].

Ниже предлагается исследование эффективности методов синтеза робастных цифровых систем с РНС по дискретной модели мехатронного объекта управления, а также влияния методов дискретизации на робастные свойства полученных вариантов САУ.

Постановка задачи исследования. Будем рассматривать варианты цифровой системы управления с РНС, структурная схема которой приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: z – оператор дискретного преобразования; y_r, y и y_m – входной и выходные сигналы объекта и наблюдателя; U – управляющее воздействие на объект; $\mathbf{x}_m$ – вектор координат состояния наблюдателя; $\mathbf{A}_d$, $\mathbf{B}_d$ и $\mathbf{C}_d$ – матрицы состояния, входа и выхода наблюдателя с размерностями $n\times n$, $1\times n$ и $n\times 1$; $\mathbf{K}_d$ – матрица регулятора состояния; $\mathbf{L}_d$ – матрица подстройки наблюдателя.

Синтез цифровой системы с РНС будем проводить методом модального управления по методике, аналогичной предложенной ранее [1, 9] для непрерывных систем, на основе дискретной передаточной функции объекта:

$$H_o(z)=\frac{B(z)}{A(z)}=\frac{b_m z^m+b_{m-1}z^{m-1}+\ldots+b_1 z+b_0}{z^n+a_{n-1}z^{n-1}+\ldots+a_1 z+a_0},$$

где m = deg $B(z)$, n = deg $A(z)$ – степени полиномов числителя и знаменателя. Предполагается, что наблюдатель состояний может быть представлен в произвольном координатном базисе, в том числе в канонических формах управляемости (КФУ) и наблюдаемости (КФН).

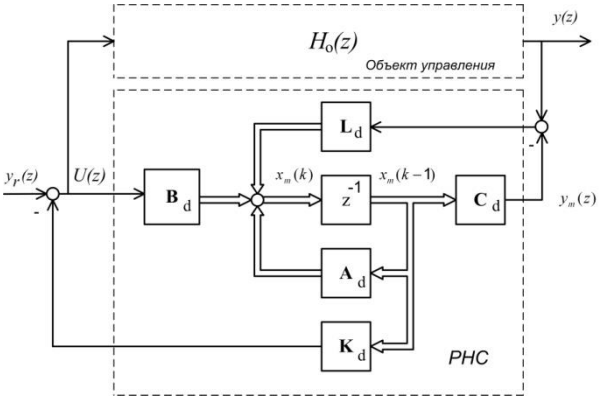


Рис. 1. Обобщенная структура цифровой системы управления с РНС

Вычисление параметров регулятора состояния (матрицы $\mathbf{K}_d$) осуществляется на основе желаемого характеристического полинома замкнутой цифровой системы с РНС $D(z)=z^n+d_{n-1}z^{n-1}+\ldots+d_1 z+d_0$ по формулам:

$$\mathbf{K}_d=\bar{\mathbf{K}}_d\cdot\bar{\mathbf{U}}_d\mathbf{U}_d^{-1};$$

$$\bar{\mathbf{K}}_d=[d_0-a_0,\ d_1-a_1,\ \ldots,\ d_{n-1}-a_{n-1}], \qquad (1)$$

где $\bar{\mathbf{U}}_d=[\bar{\mathbf{B}}_d\ \ \bar{\mathbf{A}}_d\bar{\mathbf{B}}_d\ \ \bar{\mathbf{A}}_d^2\bar{\mathbf{B}}_d\ \ldots\ \bar{\mathbf{A}}_d^{n-1}\bar{\mathbf{B}}_d]$ и $\mathbf{U}_d=[\mathbf{B}_d\ \ \mathbf{A}_d\mathbf{B}_d\ \ \mathbf{A}_d^2\mathbf{B}_d\ \ldots\ \mathbf{A}_d^{n-1}\mathbf{B}_d]$ – матрицы управляемости наблюдателя в КФУ и в его собственных координатах соответственно; $\bar{\mathbf{K}}_d$ – матрица регулятора состояния для наблюдателя, представленного в КФУ.

Вычисление матрицы подстройки наблюдателя $\mathbf{L}_d$ осуществляется на основе желаемого характеристического полинома $D^*(z)=z^n+d_{n-1}^*z^{n-1}+\ldots+d_1^*z+d_0^*$ по аналогичным (дуальным) формулам:

$$\mathbf{L}_d=\tilde{\mathbf{L}}_d\cdot\tilde{\mathbf{V}}_d\mathbf{V}_d^{-1};$$

$$\tilde{\mathbf{L}}_d=[d_0^*-a_0,\ d_1^*-a_1,\ \ldots,\ d_{n-1}^*-a_{n-1}], \qquad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{V}}_d=[\tilde{\mathbf{C}}_d^T,\ \tilde{\mathbf{A}}_d^T\tilde{\mathbf{C}}_d^T,\ \ldots,\ (\tilde{\mathbf{A}}_d^T)^{n-1}\tilde{\mathbf{C}}_d^T]$ и $\mathbf{V}_d=[\mathbf{C}_d^T,\ \mathbf{A}_d^T\mathbf{C}_d^T,\ \ldots,\ (\mathbf{A}_d^T)^{n-1}\mathbf{C}_d^T]$ – матрицы наблюдаемости в КФН и в собственных

координатах наблюдателя; $\tilde{\mathbf{L}}_d$ – матрица подстройки наблюдателя, представленного в КФН.

Значения среднегеометрических корней (СГК) полиномов контура управления *D(z)* и контура подстройки $D^*(z)$, Ω_d и Ω_d^* соответственно, в цифровой системе управления можно определить по формулам [12, 13]:

$\Omega_d = \exp(-\Omega_o T_o)$;

$\Omega_d^* = \exp(-\Omega_н T_o)$,

где Ω_o и $\Omega_н$ – СГК полиномов аналогового прототипа РНС, рад/с (в соответствии с требованием разделения темпов движений величину $\Omega_н$ выбирают в 2–3 больше, чем Ω_o).

Требуется синтезировать робастную цифровую систему управления, сохраняющую устойчивость при вариациях параметров объекта управления в заданных интервалах: $a_i \pm \Delta a_i$, $b_j \pm \Delta b_j$, i = 1, 2, … ,n; j = 1, 2,…,m. Положим, что данный объект обладает свойством управляемости и является минимально-фазовым.

Метод синтеза робастных цифровых систем с РНС. Как было показано ранее [9, 12], цифровая система управления будет обладать робастными свойствами в отношении параметров объекта управления, если регулятор является минимально-фазовым дискретными звеном, то есть нули и полюсы его передаточной функции расположены в пределах окружности единичного радиуса. Рассмотрим особенности синтеза робастной цифровой системы с РНС на основе данного постулата и исследуем факторы, влияющие на конфигурацию областей параметрической грубости САУ.

Как показывает анализ структуры САУ, приведенной на рис. 1, регулятор с наблюдателем состояния представляет собой единое динамическое звено, т. е. является по сути управляющим устройством «входа–выхода», аналогичным полиномиальному регулятору. С учетом этого дискретная передаточная функция от входа к выходу РНС как единого динамического звена определяется матричной формулой:

$$H_{PHC}(z) = \frac{U(z)}{y(z)} = \frac{R(z)}{C(z)} = \\ = \mathbf{K}_d(\mathbf{I}z - \mathbf{A}_d + \mathbf{B}_d\mathbf{K}_d + \mathbf{L}_d^T\mathbf{C}_d)^{-1}\mathbf{L}_d^T, \quad (3)$$

где *y(z)* и *U(z)* – сигналы на входе и выходе РНС; **I** – единичная матрица.

Важно отметить, что значения полиномов регулятора *R*(*z*) и *C*(*z*) не зависят от формы представления наблюдателя и определяются видом полиномов *D*(*z*) и $D^*(z)$ и значениями их среднегеометрических корней Ω_d и Ω_d^*.

В целях обеспечения параметрической грубости цифровой системы управления с РНС рекомендуется выбирать значения среднегеометрических корней характеристических полиномов *D*(*z*) и $D^*(z)$ в пределах зоны робастности, где передаточная функция регулятора (3) носит минимально-фазовый характер. Очевидно, границы этой зоны будут зависеть как от свойств самого объекта управления, т. е. расположения его нулей и полюсов, так и от применяемого метода Z-преобразования и значения периода квантования.

Для получения дискретных моделей мехатронных объектов, как правило, используются известные методы Z-преобразования [12, 13]: импульсной инвариантности (impulse); согласованного преобразования (matched); преобразования с экстраполяторами нулевого (zoh) и первого (foh) порядков; билинейного преобразования Тастина (tustin). Все указанные методы реализуются в среде MatLab при помощи функции *sysd = c2d(sys, 'zoh')*, где *sys* и *sysd* – наименования непрерывной и дискретной модели линейной системы, *zoh* – способ преобразования.

Для построения областей робастности цифровых систем управления в зависимости от применяемого метода Z-преобразования была разработана программа в среде MatLab, осуществляющая расчет параметров РНС по формулам (1) и (2), определяющая нули и полюсы передаточной функции с использованием формулы (3) и проверяющая условия параметрической грубости при вариации значений среднегеометрических корней Ω_d и Ω_d^*.

Синтез робастной системы управления мехатронным объектом с РНС. Рассмотрим синтез робастной цифровой системы с РНС на примере двухмассовой электромехатронной системы (ЭМС) с двигателем постоянного тока [4, 9], структура которой приведена на рис. 2, где *M* – электромагнитный момент; M_y – момент упругости; Ω_1, Ω_2 – угловые скорости 1-й и

2-й масс. Принятые значения параметров: C = 0,16 Вб – конструктивный параметр двигателя; T_a = 0,11 с, R_a = 3,15 Ом – постоянная времени и сопротивление якорной цепи; J_1 = 0,01, J_2 = 0,25 кг·м^2 – моменты инерции 1-й и 2-й масс; C_{12} = 0,65 Н·м – коэффициент жесткости; K_E = 0,075 кг·м^2 /с – коэффициент трения; K_{PC} = 1 и T_{PC} = 0,001 с – коэффициент и постоянная времени силового преобразователя.

Пренебрегая малой постоянной времени силового преобразователя при синтезе робастной САУ, получим следующую передаточную функцию непрерывного объекта управления:

$$H_o(s) = \frac{\Omega_2(s)}{U(s)} = \frac{13{,}853s + 120{,}06}{s^4 + 16{,}891s^3 + 145{,}9s^2 + 616{,}76s + 19{,}209}.$$

Преобразование модели объекта в дискретную форму при синтезе цифрового РНС осуществлялось средствами программного комплекса MatLab с использованием функции *sysd = c2d(sys, '…')*.

В целях исследования робастных свойств цифровой системы с РНС синтез контура управления проводился на основе желаемого полинома Ньютона, заданного в дискретной форме $D(z) = (z - \Omega_d)^4$ при вариации Ω_d, контура подстройки – на основе полинома $D^*(z) = (z - \Omega^*_d)^4$ при вариации Ω^*_d.

С использованием специально разработанной программы для цифровой системы управления с РНС, синтезированной по дискретной модели двухмассовой ЭМС, были вычислены интервалы значений СГК, в пределах которых соблюдаются условия робастности. Значения полученных интервалов робастности для различных методов дискретизации непрерывной модели объекта управления, реализуемых в среде MatLab, приведены в таблице.

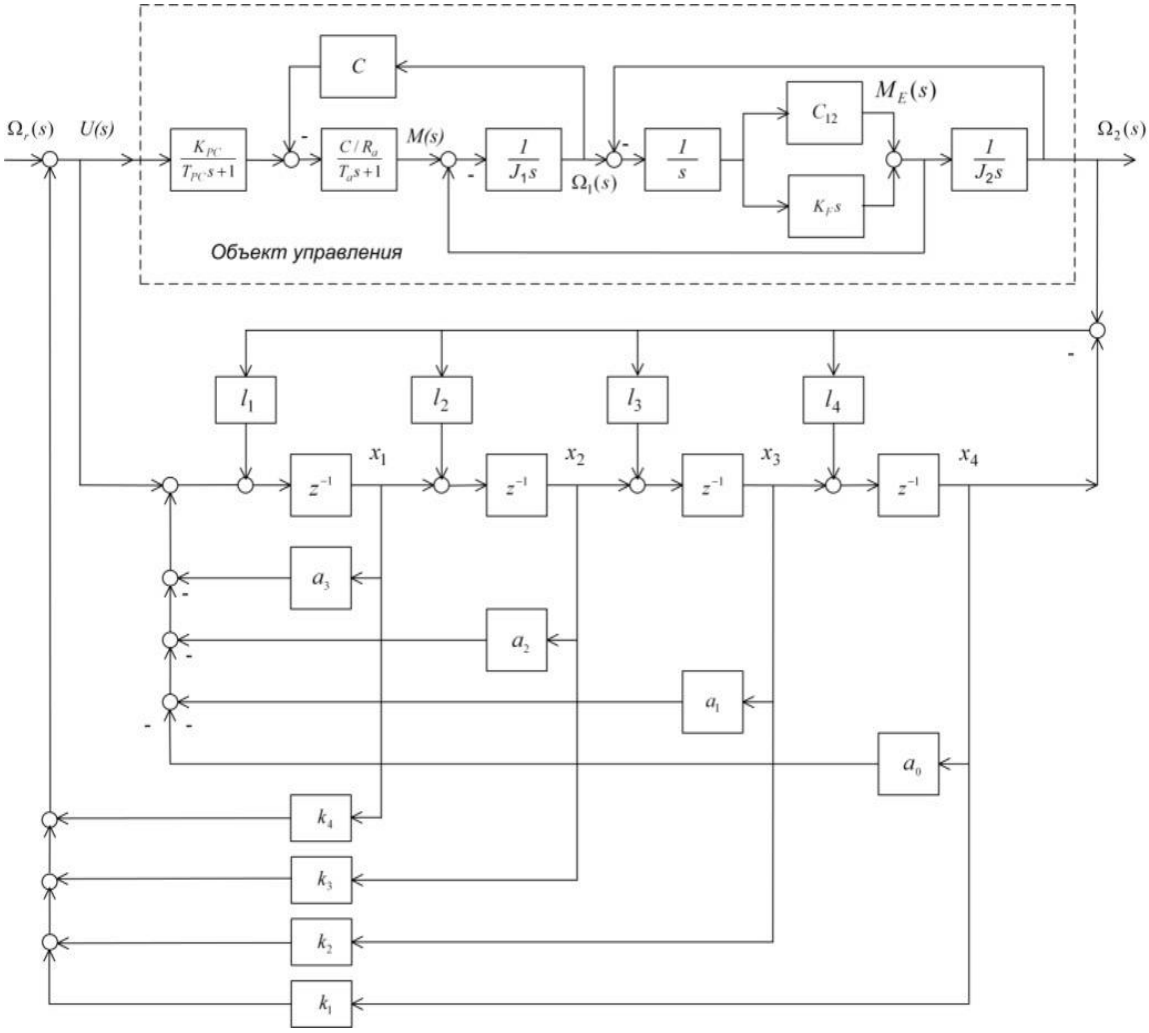


Рис. 2. Структура цифровой системы управления мехатронным объектом с наблюдателем в КФУ

Границы зон робастности цифровой системы управления с РНС

Метод Z-преобразования	Границы зоны робастности в зависимости от темпа подстройки РНС		
	$\Omega_н$ = 25 рад/с, $\Omega_o \in$	$\Omega_н$ = 35 рад/с, $\Omega_o \in$	$\Omega_н$ = 75 рад/с, $\Omega_o \in$
Аналоговый РНС	[5,2 ; 17,8]	[5,2 ; 15,3]	[5,2 ; 13,1]
‘zoh’	[2,9 ; 3,8] U [6,2 ; 17,8]	[3,4 ; 4,1] U [5,9 ; 15,4]	[4,1 ; 4,3] U [5,7 ; 13,4]
‘matched’	[2,9 ; 3,8] U [6,2 ; 17,8]	[3,4 ; 4,1] U [5,9 ; 15,4]	[4,1 ; 4,3] U [5,7 ; 13,4]
‘impulse’	[2,8 ; 3,9] U [6,2 ; 17,6]	[3,3 ; 4,1] U [5,9 ; 15,3]	[4,0 ; 4,3] U [5,7 ; 13,3]
‘foh’	[1,0 ; 2,5] U [5,1 ; 13,2]	[1,0 ; 2,5] U [4,6 ; 11,4]	[3,8 ; 9,4]
‘tastin’	[5,9 ; 15,1]	[6,2 ; 12,7]	[6,3 ; 10,1]

Конфигурация полученных областей робастности существенно зависит от метода преобразования, причем наилучшие результаты дают точные методы Z-преобразования: импульсной инвариантности (impulse); согласованного преобразования (matched); преобразования с экстраполяторами нулевого (zoh) порядка. Для указанных методов границы зон робастности цифровой системы с РНС приближаются к соответствующим границам для аналогового регулятора, синтезированного по непрерывной модели объекта.

В частности, для дискретной модели объекта, преобразованной методом ‘zoh’ при T_o = 0,01 с, в зоне робастности при Ω_o = 15 рад/с и $\Omega_н$ = 75 рад/с были получены следующие параметры РНС:

$\mathbf{K}_d$ = [0,295 –0,970 1,062 –0,388];

$\mathbf{L}_d$ = [1,488 10^9 1,364 10^9 1,251 10^9 1,147 10^9].

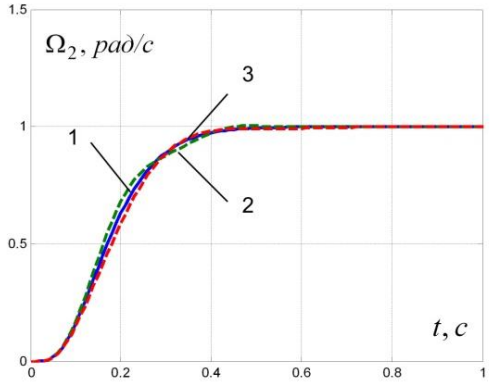
Вне зоны робастности при Ω_o = 30 рад/с и $\Omega_н$ = 75 рад/с были получены следующие параметры:

$\mathbf{K}_d$ = [0,543 –1,894 2,214 –0,868];

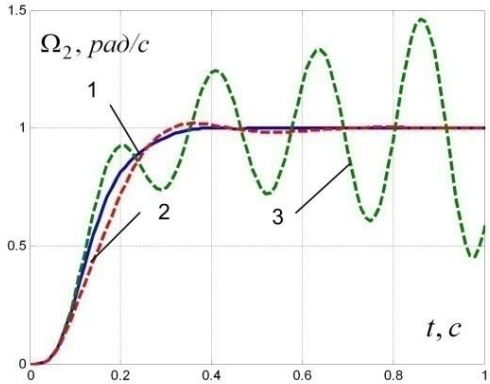
$\mathbf{L}_d$ = [1,488 10^9 1,364 10^9 1,251 10^9 1,147 10^9].

Графики переходных процессов в системе с РНС при соблюдении (Ω_o = 15 рад/с) и нарушении (Ω_o = 30 рад/с) условий робастности для $\Omega_н$ = 75 рад/с приведены на рис. 3,а,б соответственно, где кривая 1 соответствует номинальным параметрам объекта управления, кривые 2 и 3 – вариации параметра J_2 = 0,15 ± 0,3 кг·м^2. Как показывает анализ полученных данных, при нарушении условий робастности параметрическая чувствительность цифровой системы управления мехатронным объектом с РНС существенно возрастает.

Чувствительность к вариациям собственных параметров РНС. Вопросы чувствительности РНС к вариациям собственных параметров не теряют своей актуальности даже при цифровой реализации, поскольку ограниченная разрядная сетка вычислителя, квантование сигналов по уровню и по времени могут существенно затруднить практическую реализацию такого устройства и ухудшить качество управления при низком уровне его собственной параметрической грубости [1, 2].



а)



б)

Рис. 3. Переходные характеристики системы с РНС в зоне робастности (а) и за ее пределами (б)

Структурная схема на рис. 1 наглядно показывает, что совокупность асимптотического наблюдателя и регулятора состояния представляет собой самостоятельную

динамическую систему с двумя комплексами обратных связей, образуемых элементами матрицы $\mathbf{K}_d$ по координатам состояния НС и элементами матрицы **L** – по его выходной координате.

Как было показано ранее [2] для аналоговых систем управления, РНС как единое динамическое звено обладает низкой чувствительностью к вариациям собственных параметров, если все обратные связи по координатам состояния (матрица $\mathbf{K_d}$) и по выходной координате объекта управления (матрица **L**) являются отрицательными. При этом появление положительных обратных связей считается признаком высокой параметрической чувствительности РНС, поскольку приводит к снижению запаса устойчивости системы.

Указанные условия параметрической грубости аналоговых РНС обеспечиваются путем формирования темпа процесса управления путем выбора значения СГК полинома $D(z)$ и темпа процесса подстройки путем выбора значения СГК полинома $D^*(z)$ в пределах соответствующих зон робастности, исключающих появление положительных коэффициентов матриц обратных связей $\mathbf{K_d}$ и **L**.

В случае цифровой реализации наблюдателя состояния определить характер обратных связей оказывается затруднительно, поскольку даже для минимально-фазового звена коэффициенты дискретной передаточной функции могут принимать отрицательные значения. В связи с этим предлагается преобразовать матрицы цифрового наблюдателя состояния в непрерывную форму и определять зоны робастности для аналогового прототипа РНС.

Для построения областей робастности цифровых РНС была разработана программа в среде MatLab, осуществляющая преобразования наблюдателя в непрерывную форму с использованием функции *sys = d2c(sysd, 'zoh')*, расчет матриц контура управления $\mathbf{K_d}$ и контура подстройки **L** при вариации значений СГК характеристических полиномов и анализ характера обратных связей.

Важную роль в обеспечении параметрической грубости РНС играет выбор формы структурного представления наблюдателя, определяющий в основном конфигурацию областей робастности, в пределах которых гарантируется отсутствие положительных обратных связей.

В случае тенденции к вырождению передаточной функции объекта управления наблюдатель в КФУ будет терять наблюдаемость, что приведет к формированию положительных обратных связей в контуре подстройки, а наблюдатель в КФН будет терять управляемость, что приведет к формированию положительных обратных связей в контуре управления.

В этой ситуации более рациональным зачастую оказывается реализовать наблюдатель в форме объекта управления или в других формах, обладающих оптимальным (сбалансированным) сочетанием свойств управляемости и наблюдаемости [2, 15].

Рассмотрим влияние формы структурного представления наблюдателя состояний на чувствительность цифровой системы управления к вариациям собственных параметров РНС на примере двухмассовой МС с двигателем постоянного тока (рис. 2).

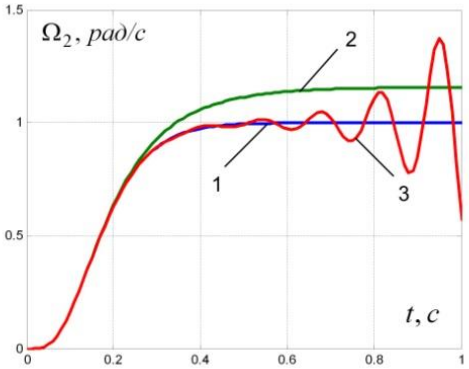
Синтезируем варианты цифровой системы с наблюдателями состояний различной структуры (КФУ, КФН и форма объекта) для значений СГК Ω_o = 12,5 рад/с и $\Omega_н$ = 25 рад/с, при которых аналоговый прототип системы обладает высокой чувствительностью к вариациям собственных параметров РНС.

При реализации РНС в координатах объекта управления для получения матриц $\mathbf{A}_d$, $\mathbf{B}_d$ и $\mathbf{C}_d$ в цифровой форме целесообразно использовать метод согласованного Z-преобразования (matched), поскольку в этом случае структура наблюдателя получается наименее сложной и в наибольшей степени соответствует структуре непрерывного объекта.

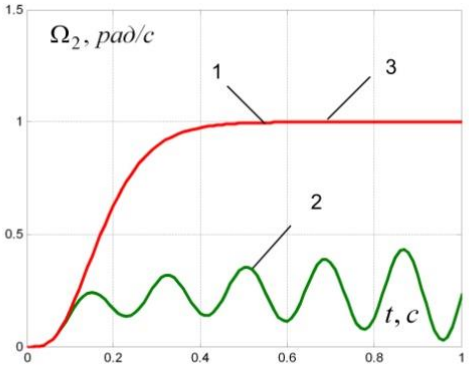
Переходные характеристики цифровой системы управления с РНС в формах КФУ, КФН и в форме объекта приведены на рис. 4,а,б,в соответственно, где кривая 1 соответствует номинальным параметрам РНС, кривая 2 – увеличению параметра k_1 на 0,1 %, кривая 3 – увеличению l_1 на 0,1 %.

Как показывает анализ полученных характеристик, цифровая система с наблюдателем состояний в канонических формах (КФУ и КФН), как и аналоговый прототип САУ, при заданном быстродействии обладает высокой чувствительностью к вариациям собственных параметров РНС. В то же время система с наблюдателем в координатах объекта управления имеет более широкую зону параметриче-

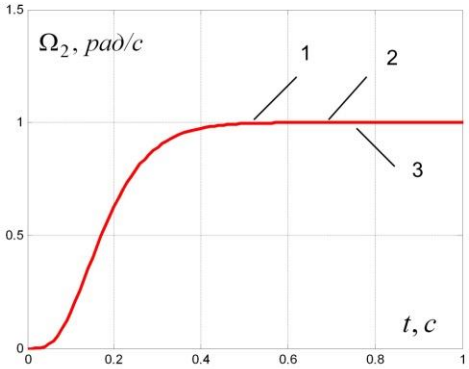
ской грубости, что обеспечивает значительно меньшую чувствительность к параметрическим возмущениям.



а)



б)



в)

Рис. 4. Переходные характеристики цифровой системы с наблюдателем, реализованным в КФУ (а), в КФН (б) и в форме объекта (в)

Выводы. Таким образом, формирование характеристического полинома САУ в пределах области параметрической грубости, обеспечивающее минимально-фазовый характер передаточной функции РНС, позволяет синтезировать робастную цифровую систему управления. При этом конфигурация зоны параметрической грубости цифровой системы соответствует зоне аналогового прототипа, синтезированного по непрерывной модели объекта.

При тенденции объекта к вырождению передаточной функции в цифровой системе с РНС возрастает чувствительность к вариациям собственных параметров регулятора, что осложняет микропроцессорную реализацию управляющего устройства. В этой ситуации более рациональным оказывается реализовать наблюдатель в форме объекта управления или в других формах, обладающих оптимальным сочетанием свойств управляемости и наблюдаемости.

Список литературы

1. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами. – Иваново, 2015. – 296 с.
2. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 5. – С. 3–14.
3. **Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б.** О проблеме неробастности спектра в задачах модального управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 10. – С. 8–13.
4. **Джури Э.И.** Робастность дискретных систем // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 3. – С. 3–28.
5. **Гайдук А.Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
6. **Подчукаев В.А.** Аналитические методы теории автоматического управления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 256 с.
7. **Поляк Б.Т., Щербаков П.С**. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
8. **Поляк Б.Т., Щербаков П.С.** Сложные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 5. – С. 7–46.
9. **Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.
10. **Волгин Л.Н.** О грубых системах управления // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 4. – С. 186–187.
11. **Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э.** Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
12. **Куо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.
13. **Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.

14. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. / под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 464 с.

15. Ober R., McFarlane D. Balanced Canonical Forms for Minimal Systems: A Normalized Coprime Factor Approach // Linear Algebra Appl. – 1989. – Vol. 122–124. – P. 23–64.

References

1. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. *Strukturno-parametricheskiy sintez, optimizatsiya i nastroyka sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami* [Structural and Parametrical Synthesis, Optimization and Tuning of Control Systems for Industrial Plants]. Ivanovo, 2015. 296 p.

2. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. Osobennosti sinteza parametricheski grubykh sistem modal'nogo upravleniya s nablyudatelyami sostoyaniya [Peculiarities of synthesis of parametrically robust modal control systems with state observers]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2012, no. 5, pp. 3–14.

3. Filimonov, A.B., Filimonov, N.B. O probleme nerobastnosti spektra v zadachakh modal'nogo upravleniya [The problem of spectre non-robustness in modal control tasks]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2011, no. 10, pp. 8–13.

4. Dzhuri, E.I. Robastnost' diskretnykh sistem [Robustness of discrete systems]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 1999, no. 3, pp. 3–28.

5. Gaiduk, A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyy podkhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow: FIZMATLIT, 2012. 360 p.

6. Podchukaev, V.A. *Analiticheskie metody teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Analytical Methods of Automatic Control Theory]. Moscow: FIZMATLIT, 2002. 256 p.

7. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravlenie* [Robust Stability and Control]. Moscow: Nauka, 2002. 303 p.

8. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. Slozhnye zadachi lineynoy teorii upravleniya. Nekotorye podkhody k resheniyu [Difficult tasks of linear control theory. Some approaches to their solution]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 2005, no. 5, pp. 7–46.

9. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob"ektami* [Robust Modal Control for Technological Objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.

10. Volgin, L.N. O grubykh sistemakh upravleniya [Robust control systems]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 1989, no. 4, pp. 186–187.

11. Gudvin, G.K., Grebe, S.F., Sal'gado, M.E. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Control System Design]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2004. 911 p.

12. Kuo, B.C. *Teoriya i proektirovanie tsifrovykh sistem upravleniya* [Theory and design of automatic control systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 488 p.

13. Andrievskiy, B.R., Fradkov, A.L. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* [Selected chapters of automatic control theory with examples in MATLAB language]. Saint-Petersburg: Nauka, 1999. 467 p.

14. Shenfel'd, R., Khabiger, E. *Avtomatizirovannye elektroprivody* [Automatic electric drives]. Leningrad: Energoatomizdat, 1985. 464 p.

15. Ober, R., McFarlane, D. Balanced Canonical Forms for Minimal Systems: A Normalized Coprime Factor Approach. *Linear Algebra Appl*, 1989, vol. 122–124, pp. 23–64.

УДК 621.314.26

Александр Аркадьевич Николаев
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Ильдар Галиевич Гилемов
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

Разработка и исследование усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с изменяемыми таблицами углов переключения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Главные электроприводы современных прокатных станов выполняются на преобразователях частоты с активными выпрямителями. Во время работы АВ потребляют несинусоидальный ток, оказывая негативное влияние на питающую сеть. В целях улучшения показателей качества напряжения в АВ применяют специальные алгоритмы широтно-импульсной модуляции. Широкое распространение получил алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник. Однако применение такого алгоритма не всегда позволяет оптимизировать работу АВ в условиях меняющихся параметров электротехнического комплекса при различных режимах работы. В связи с этим необходимо решение, позволяющее улучшить показатели качества электроэнергии в заводских сетях с мощными ПЧ с АВ.
Материалы и методы. Для выполнения исследований реализована математическая модель ПЧ с АВ с усовершенствованным алгоритмом ШИМ в среде Matlab-Simulink на основе параметров главного электропривода стана «2000» холодной прокатки ЛПЦ-11 ПАО «ММК». Основным допущением является представление в имитационной модели инвертора в виде источника тока.
Результаты. Разработан усовершенствованный алгоритм с возможностью выбора таблиц углов переключения на основе ШИМ с удалением выделенных гармоник. Исследована работа ПЧ с АВ с предложенным усовершенствованным алгоритмом ШИМ при изменении таблиц углов переключения ключей. Произведен сравнительный анализ мгновенных значений напряжений и токов АВ при переходах на таблицы со схожими углами переключения и значительно отличающимися. Установлено, что изменения таблиц углов переключения не оказывают существенного негативного влияния на работу ПЧ с АВ.
Выводы. Предложенный усовершенствованный алгоритм ШИМ может быть использован для улучшения показателей качества электроэнергии в электротехнических комплексах с ПЧ с АВ за счет применения оптимальных таблиц углов переключения в условиях различных режимов системы электроснабжения. Адекватность имитационной модели ранее была подтверждена экспериментальными данными и предыдущими исследованиями.

Ключевые слова: активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, преобразователь частоты, качество электроэнергии

Alexander Arkadyevich Nikolaev
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Il'dar Galievich Gilemov
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Postgraduate student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

© Николаев А.А., Гилемов И.Г., 2020
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 6, с. 48–56.

Development and research of improved PWM algorithm of an active rectifier with variable switching angle tables

Abstract

Background. Modern electric drives of rolling mills are based on frequency converters with active rectifiers (AR). During operation, active rectifiers consume non-sinusoidal current, having a negative effect on the supply network. In order to improve the performance index of voltage quality, AR special algorithms of pulse-width modulation are used. Selective harmonic elimination (SHE) PWM algorithm has become widespread. However, application of SHE PWM algorithm does not always allow to optimize the operation of the AR under the conditions of changing parameters of the electro-technical complex under various operating modes. Therefore, a solution is needed to improve the electrical power quality index of plant networks with powerful frequency converter with AR.
Materials and methods. To carry out the research, a mathematical model of the frequency converter with active rectifiers was implemented with an improved PWM algorithm in the Matlab-Simulink environment based on the parameters of the main electric drive of the 2000 cold rolling mill “LPC-11” of PJSC “ММК”. The main assumption of the simulation model is that the inverter is represented as a current source.
Results. An improved algorithm with the ability to select tables of switching angles based on SHE PWM has been developed. The operation of the FC with AR with the proposed improved PWM algorithm with variable tables of switching angles has been investigated. A comparative analysis of the instantaneous values of AR voltages and currents when transferring to the tables with similar switching angles and significantly different ones has been made. It has been found that changing the tables of switching angles does not have a significant negative effect on the operation of the FC with AR.
Conclusions. The proposed improved PWM algorithm can be used to improve the performance index of power quality in electrotechnical complexes with FC and AR by using optimal tables of switching angles in conditions of various modes of the power supply system. The adequacy of the simulation model has previously been confirmed by experimental data and previous studies.

Key words: active rectifier, pulse-width modulation, frequency converter, electrical power quality

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.048-056

Введение. Широкое внедрение в промышленности электроприводов (ЭП) с преобразователями частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ) обусловлено их преимуществами по отношению к другим преобразователям: возможностью рекуперации электрической энергии в питающую сеть и работой с регулируемым коэффициентом мощности [1]. Эти достоинства способствовали активному распространению ЭП с ПЧ с АВ в металлургии в качестве главных ЭП станов холодной и горячей прокатки [2, 3]. Технологический процесс прокатки металла требует создания на валках стана значительных моментов и связан с частыми динамическими режимами. Поэтому в таких ЭП применяются ПЧ с АВ с синхронными или асинхронными двигателями большой мощности [3–5].

Наибольшее распространение в настоящее время получила трехуровневая топология построения АВ с фиксированной средней точкой [4, 5]. Использование четырех полностью управляемых силовых ключей в каждой фазе позволяет получить на входе АВ три уровня напряжения: 0, $-U_{DC}/2$, $+U_{DC}/2$, что улучшает синусоидальность потребляемого тока и снижает величину суммарного коэффициента гармонических составляющих сетевого напряжения по сравнению с двухуровневой топологией. В качестве силовых ключей, как правило, выступают IGBT-транзисторы или IGCT-тиристоры, работающие с относительно низкой частотой коммутации для снижения потерь при переключениях [6].

Для управления силовыми ключами применяются различные алгоритмы ШИМ. В целях снижения негативного влияния АВ на питающую сеть при низкой частоте коммутации силовых ключей все большее распространение получает алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник, позволяющий исключить из гармонического спектра потребляемого тока заранее определенные гармоники [7–10]. Также находят применение метод ШИМ с оптимальной минимизацией суммарного коэффициента гармонических составляющих [11] и другие различные гибридные методы [12].

В [13] на основе алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник была предложена усовершенствованная система, сущность которой сводится к выбору таблиц с заранее рассчитанными углами переключения силовых ключей АВ в зависимости от предъявляемых критериев. Применение различных таблиц позволяет, например, оптимизировать работу ПЧ с АВ при изменении параметров электротехнического комплекса. Так как в [13] исследованию подверглись только статические режимы работы ПЧ с АВ, необходимо проверить работу АВ при переключениях таблиц и воздействие таких переключений на основные параметры работы ПЧ и общую устойчивость системы.

Методы исследования. Основные принципы предлагаемого усовершенствованного алгоритма и разработанная имитационная модель уже были описаны в [13]. На рис. 1 показаны два силовых трансформатора Т1 и Т2, реализующие 12-пульсную схему выпрямления и подключенные к сети 10 кВ через вакуумный выключатель Q1. От каждого трансформатора через реакторы Р1 и Р2 получают питание активные выпрямители АВ1 и АВ2. Выходы АВ подсоединены к общему звену постоянного тока, состоящего из двух эквивалентных конденсаторов С1 и С2. От звена постоянного тока получают питание автономные инверторы напряжения АИН1 и АИН2, к которым подключен синхронный двигатель СД. Обмотка возбуждения ОВ СД получает питание от тиристорного возбудителя ТВ, запитанного от сети через ячейку Q2 и трансформатор Т3.

В систему управления АВ из силовой части электропривода поступают сигналы величин напряжений на входе АВ U_{abc}, потребляемых токов i_{abc} и напряжения в звене постоянного тока U_{DC}. Датчики напряжения необходимы для преобразования входных величин в требуемый системой управления вид: сетевое напряжение U_C и напряжение в звене постоянного тока $U_{DC.факт}$. Фильтр низких частот необходим для устойчивой работы системы управления из-за присутствия в токах значительных величин низких гармонических составляющих. Для преобразования величин в различных системах координат служат блоки *abc/dq*0 и *dq*0/*m*Θ. Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) применяется для синхронизации с питающей сетью векторов системы управления АВ.

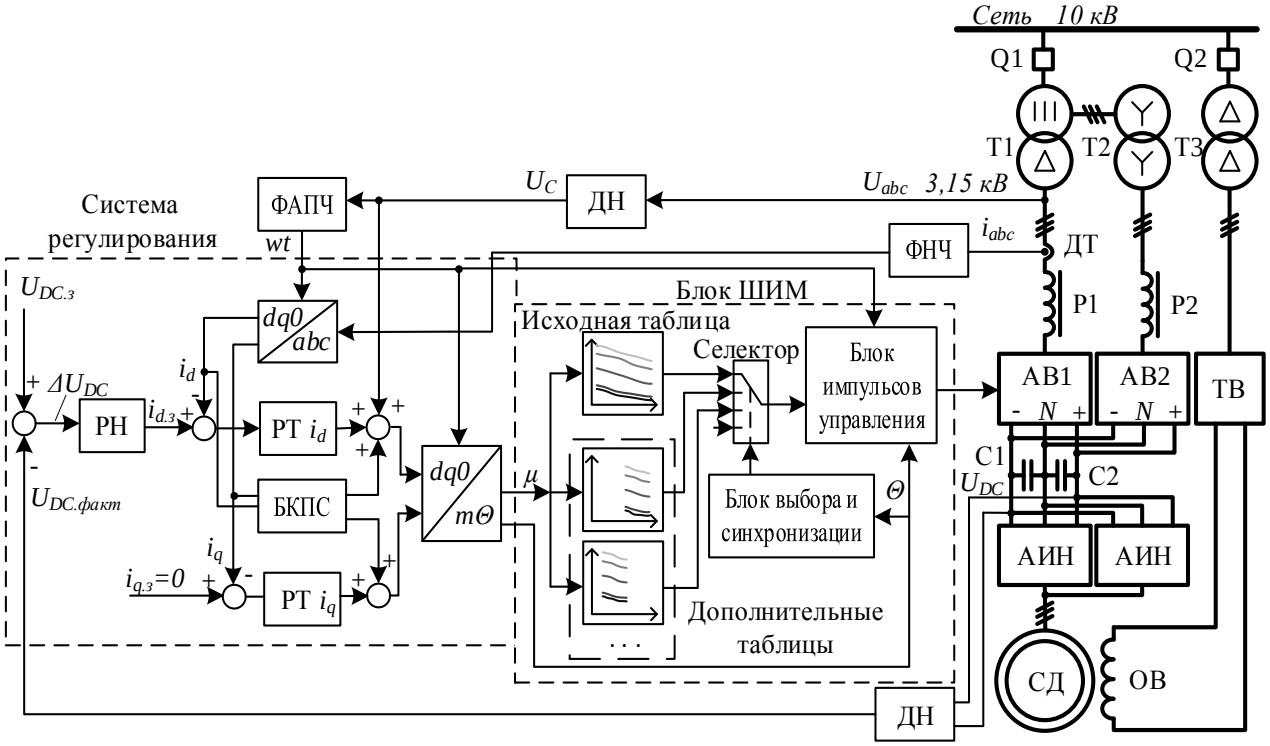


Рис. 1. Упрощенная структурная схема усовершенствованной системы управления АВ и силовой части ЭП

Система регулирования состоит из двух контуров. Внутренний контур обеспечивает регулирование величин токов во вращающейся системе координат *dq*, внешний – регулирование напряжения в звене постоянного тока. На вход пропорционально-интегрального регулятора напряжения РН подается разность ΔU_{DC} между заданием напряжения $U_{DC.з}$ и фактической величиной $U_{DC.факт}$. Выход регулятора напряжения обеспечивает величину задания тока $i_{d.з}$, поступающую на вход регулятора тока по оси *d* – РТ i_d. Величина задания тока по оси *q*, соответствующая величине задания реактивной составляющей потребляемого тока и поступающая на регулятор РТ i_q, как правило, задается равной $i_{q.з}$ = 0. Блок БКПС служит для компенсации перекрестных связей объекта регулирования. Сигналы с выходов регуляторов тока после преобразования поступают в блок ШИМ в виде пространственного вектора длинной μ и углом Θ.

В блоке ШИМ кроме исходной таблицы с величинами углов переключения также рассчитаны дополнительные. Блок выбора и синхронизации с учетом определенных условий формирует сигнал на селектор, который обеспечивает выбор необходимой таблицы и передачу сигналов в блок генерирования импульсов управления силовыми ключами.

Для проведения исследований динамических режимов работы ПЧ с АВ при переключениях с одной таблицы на другую были рассчитаны две дополнительные таблицы. Величины углов в основной таблице рассчитывались таким образом, чтобы исключить из гармонического спектра потребляемого тока низкочастотные гармоники: 11, 13, 23 и 25. При расчетах дополнительных таблиц вместо 25 гармоники исключалась 35. Углы первой дополнительной таблицы подбирались максимально близкими к углам исходной таблицы, углы второй – максимально отличающимися (рис. 2). Величина нагрузки в моменты переключений не изменялась и соответствовала работе АВ с коэффициентом модуляции системы управления $\mu \approx 0{,}83$ о.е. Соответственно, в дополнительных таблицах использовались такие наборы углов переключения, обеспечивающие достаточный для переключений диапазон. Такой подход необходим для оценки устойчивости работы АВ при переходах на различные таблицы и анализа динамических параметров.

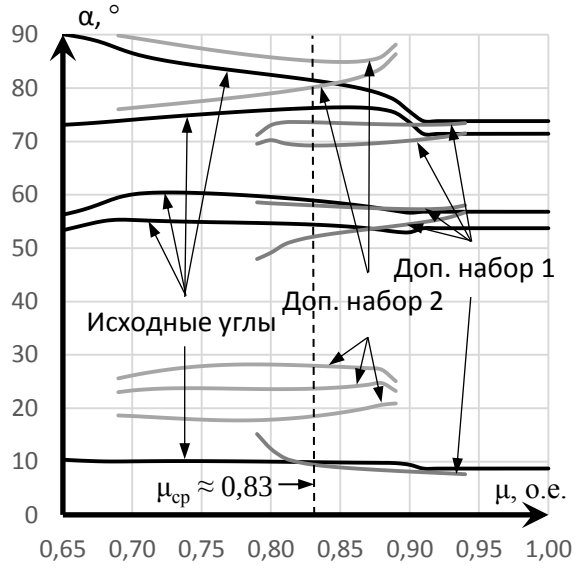


Рис. 2. Зависимости наборов углов переключения тиристоров от коэффициента модуляции μ

Для разработки имитационной математической модели применялась программная среда Matlab-Simulink и использовались параметры стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК» (рис. 3). Питающая сеть 10 кВ представлена последовательным соединением блоков идеального трехфазного источника напряжения *Three-Phase Programmable Voltage Source* и активно-индуктивно-емкостного сопротивления *Three-Phase Series RLC Branch*. Для проведения измерений величин токов и напряжений применялись блоки *Three-Phase V-I Measurement*. Трансформаторы Т1 и Т2 замещены эквивалентным трансформатором с двумя вторичными обмотками *Three-Phase Transformer (Three Windings)*. Для моделирования реакторов Р1 и Р2 на входах АВ применены блоки *Three-Phase Series RLC Branch*. Активные выпрямители АВ1 и АВ2 описаны с использованием блоков *Three-Level Bridge*. Работа АИН и СД в имитационной модели представлена в качестве эквивалентного источника тока *Controlled Current Source* [14, 15]. Эквивалентная емкость С1 и С2 в звене постоянного тока реализована с использованием блоков *Three-Phase Series RLC Branch.*

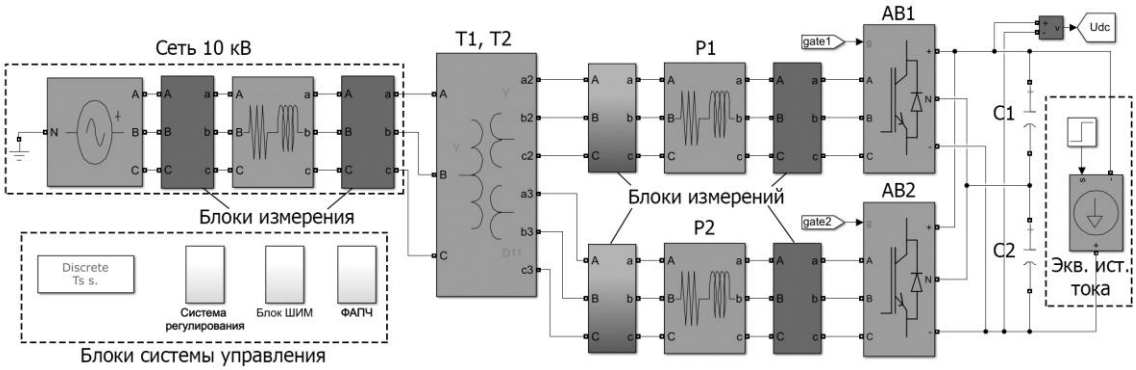


Рис. 3. Имитационная модель ПЧ с АВ, реализованная в среде Matlab-Simulink

При переключениях на дополнительные таблицы система управления должна контролировать ряд следующих важных параметров.

1. При выборе дополнительной таблицы необходимо, чтобы она описывала углы в достаточном диапазоне изменения коэффициента модуляции в зависимости от текущего его значения. В имитационной модели переключения на дополнительную таблицу разрешались с учетом 10 % запаса от общего диапазона описания таблицы для обеспечения устойчивых переключений.

2. Переключения не должны осуществляться в динамических режимах работы ПЧ, поэтому необходимо контролировать производную коэффициента модуляции. При проведении исследований переключения допускались системой управления только при величине производной коэффициента модуляции $d\mu/dt$ < 0,5 о.е./с с фильтром 50 мс.

3. Выбор таблицы должен осуществляться при наличии сигнала от АСУ ТП, анализирующей состояние электротехнического комплекса, в зависимости от необходимых критериев, среди которых могут быть одновременная работа мощных потребителей на одной линии или только одного из них, снижение напряжения питающей сети, работа преобразователя частоты с неполной нагрузкой и другие.

Результаты исследования. При имитационном моделировании работы АВ в статическом режиме работы производилось переключение с исходной таблицы на каждую из дополнительных. При переключениях величина нагрузки АВ не изменялась. В обоих случаях были получены осциллограммы сетевого напряжения U_C, сетевого тока I_C и напряжения на конденсаторах в звене постоянного тока U_{DC} (рис. 4 и рис. 6 при переключениях с исходной на дополнительную таблицу №1 и №2 соответственно). Также на рис. 5 и рис. 7 приведены осциллограммы напряжения на входе каждого АВ U_{AB} и потребляемого каждым АВ тока I_{AB} для двух экспериментов.

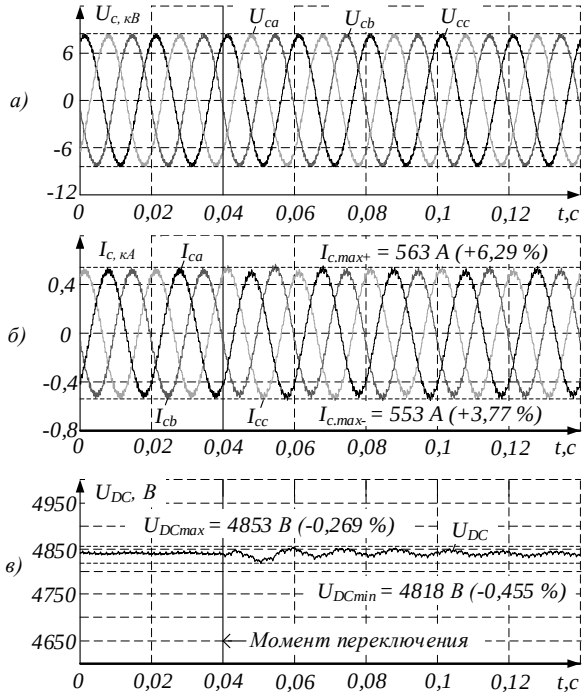


Рис. 4. Осциллограммы: а – сетевого напряжения; б – потребляемого АВ тока; в – напряжения в звене постоянного тока при переключении с исходной таблицы на первую дополнительную

В первом эксперименте при переключении с исходной таблицы на дополнительную таблицу №1 (рис. 4) возмущающее влияние на сетевое напряжение является незначительным. Наибольшее значение потребляемого ПЧ тока составило $I_{C.maxB+}$ = 563 А, что выше установившегося значения в статическом режиме работы до переключения на 33 А, или 6,29 %. В отрицательной полуволне значение сетевого тока достигло $I_{C.maxC+}$ = 553 А (+20 А, или +3,77 %). Напряжение в звене постоянного

тока достигло максимума $U_{DC\max}$ = 4853 В, что больше заданного значения $U_{DC.зад}$ = 4840 В на 13 В, или 0,269 %. Минимальное значение напряжения достигло величины $U_{DC\min}$ = 4818 В, что меньше заданного значения на 22 В, или на 0,455 %.

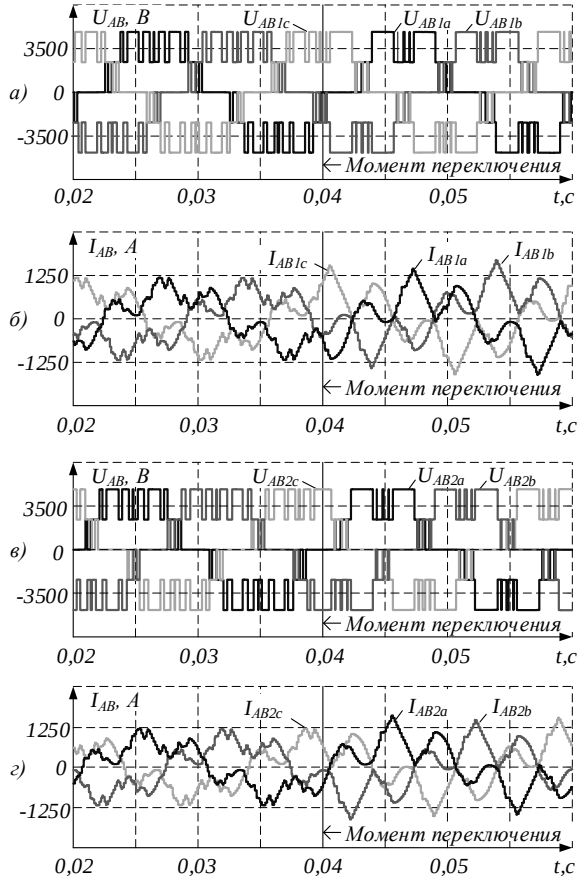


Рис. 5. Осциллограммы при переключении с исходной таблицы на первую дополнительную: а, в – фазного напряжения; б, г – потребляемого тока каждого АВ

Во втором эксперименте при переключении с исходной таблицы на дополнительную таблицу №2 (рис. 6) возмущающее влияние на сетевое напряжение также является незначительным и не анализировалось. Наибольшее значение потребляемого ПЧ тока составило $I_{C.\max C+}$ = 582 А, что выше установившегося значения в статическом режиме работы до переключения на 51 А, или 9,30 %. В отрицательной полуволне значение сетевого тока достигло $I_{C.\max A+}$ = 590 А (+56 А, или +10,8 %). Напряжение в звене постоянного тока достигло максимума $U_{DC\max}$ = 4867 В, что больше заданного значения $U_{DC.зад}$ = 4840 В на 27 В, или 0,558 %. Минимальное значение напряжения достигло величины $U_{DC\min}$ = 4796 В, что меньше заданного значения на 44 В, или на 0,909 %.

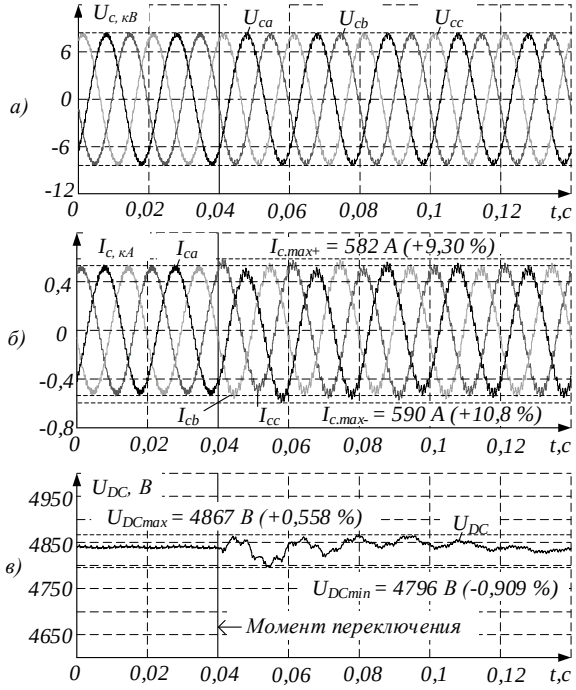


Рис. 6. Осциллограммы при переключении с исходной таблицы на вторую дополнительную: а – сетевого напряжения; б – потребляемого АВ тока; в – напряжения в звене постоянного тока

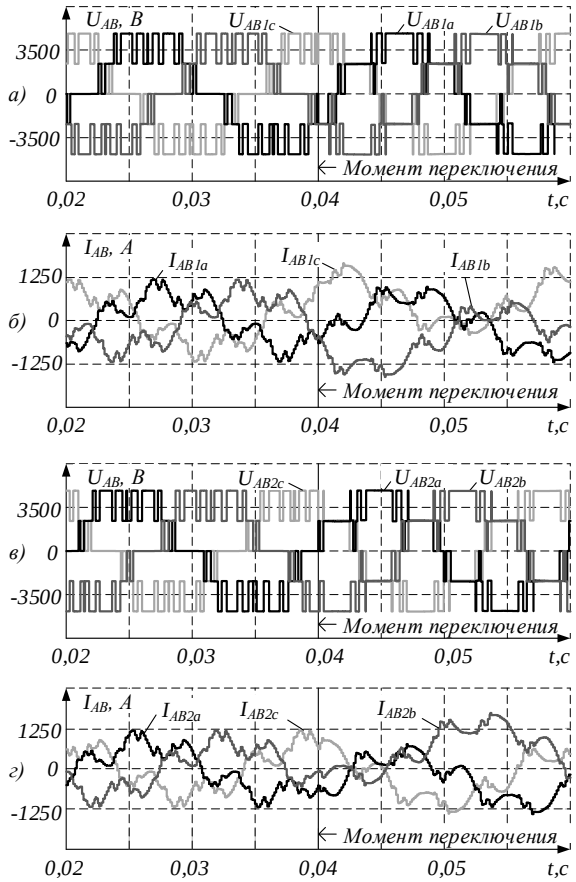


Рис. 7. Осциллограммы при переключении с исходной таблицы на вторую дополнительную: а, в – фазного напряжения; б, г – потребляемого тока каждого АВ

Для удобства сравнения результатов эксперимента все основные данные сведены в таблицу.

Показатели переходных процессов

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2
$I_{C.max+}$	563 А (+33 А)	582 А (+51 А)
	+6,29 %	9,30 %
$I_{C.max-}$	553 А (+20 А)	590 А (+56 А)
	+3,77 %	+10,8 %
$U_{DC.max}$	4853 В (+13 В)	4867 В (+27 В)
	+0,269 %	+0,558 %
$U_{DC.min}$	4818 В (– 22 В)	4796 В (–44 В)
	–0,455 %	–0,909 %

На основании анализа показателей качества переходных процессов, представленных в таблице, можно сделать вывод, что переход с исходной таблицы на дополнительную таблицу №1, углы переключения силовых ключей в которой имеют близкие значения с исходной, и переход на дополнительную таблицу №2 с значительно отличающимися углами переключения от исходной не вызывает сильных возмущающих воздействий на работу ПЧ, способных привести к срабатыванию аппаратных или программных защит преобразователя, а именно защиты по максимальному току или по величине напряжения в звене постоянного тока. Однако следует отметить, что переход на дополнительную таблицу №1 вызывает меньшие (примерно в 2 раза) колебания потребляемого ПЧ тока и напряжения в звене постоянного тока.

Выводы. Предложенная усовершенствованная система управления АВ на базе алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник включает в себя две дополнительные таблицы с близкими и сильно отличающимися от исходной углами переключения силовых ключей. В среде Matlab-Simulink на основе параметров главного электропривода стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК» реализована имитационная модель ПЧ с АВ с предложенным усовершенствованным алгоритмом.

По результатам двух экспериментов на имитационной модели сделан вывод о устойчивой работоспособности ПЧ при переходе системой управления с исходной таблицы на дополнительные таблицы углов переключения силовых ключей АВ. Переход на дополнительную таблицу с углами переключения, приближенными к исходной, вызывает меньшие колебания потребляемого ПЧ тока и напряжения в звене постоянного тока. При реализации усовершенствованной системы управления желательно обеспечить расчет углов, максимально схожих с исходной таблицей.

При переходе с одной таблицы на другую на период переходных процессов в ПЧ требуется ограничить переключения на другие таблицы для обеспечения устойчивой работы ПЧ.

Наибольшую эффективность данный усовершенствованный алгоритм показывает при применении в ПЧ с АВ большой мощности в условиях частых изменений режимов внутризаводского электроснабжения и режимов работы других мощных потребителей электрической энергии в электротехническом комплексе.

Список литературы

1. **Исследование** воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 80–83.

2. **Экспериментальные** исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 96–105.

3. **Использование** статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутризаводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 1. – С. 1–11.

4. **Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 3–9.

5. **Маклаков А.С.** Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16–25.

6. **Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов //

Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 48–52.

7. **Крубцов Д.С., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П.** Способы управления активными выпрямителями главных электроприводов прокатных станов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2013. – № 71. – С. 3–6.

8. **Маклаков А.С., Маклакова Е.А.** Анализ электромагнитной совместимости 18-пульсной схемы соединения трехуровневых АВН при использовании метода ШИМ с удалением выделенных гармоник // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 4, №1. – С. 66–73.

9. **Радионов А.А., Маклаков А.С., Цзин Тао.** Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 1(42). – С. 38–44.

10. **Гасияров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С.** Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С. 4–9.

11. **Сравнение** способов оптимальной минимизации коэффициента гармоник и исключения гармоник с регулированием напряжения для инверторов с многоуровневым выходным напряжением / С.В. Аверин, Т.В. Анисимова, А.Н. Данилина и др. // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 1(37). – С. 19–26.

12. **Маклаков А.С.** Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 92–100. doi: 10.14529/power180112

13. **Николаев А.А., Гилемов И.Г.** Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 4(45). – С. 35–42. doi: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42.

14. **Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Antropova L.I.** Fearures of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for power quality analysis in internal power supply systems // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. – 2020. – С. 774–778. doi:10.1109/eiconrus49466.2020.9038988.

15. **Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 3–7.

References

1. Khramshin, T.R., Kornilov, G.P., Nikolaev, A.A., Khramshin, R.R., Krubtsov, D.S. Issledovanie vozdeystviya aktivnykh vypryamiteley bol'shoy moshchnosti na pitayushchuyu set' [Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 80–83.

2. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khramshin, T.R., Nikiforov, G., Mutallapova, F.F. Eksperimental'nye issledovaniya elektromagnitnoy sovmestimosti sovremennykh elektroprivodov v sisteme elektrosnabzheniya metallurgicheskogo predpriyatiya [Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of iron and steel enterprise]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–105.

3. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Ivekeev, V.S., Lozhkin, I.A., Kotyishev, V.E. Ispol'zovanie staticheskogo tiristornogo kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi dlya obespecheniya ustoychivosti elektro-energeticheskoy sistemy i povysheniya nadezhnosti vnutrizavodskogo elektrosnabzheniya [Application of the Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Steel Furnance to Support Electrical Power System Stability and Increase Reliability of Factory Power Supply]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 1, pp. 1–11.

4. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' aktivnogo vypryamitelya v nesimmetrichnykh rezhimakh raboty [Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3–9.

5. Maklakov, A.S. Imitatsionnoe modelirovanie glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tolstolistovogo stana 5000 [Simulation of the Main Electric Drive of the 5000 plate mill]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 16–25.

6. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Otsenka metodov shirotno-impul'snoy modulyatsii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov [Evaluation of PWM methods of voltage of active rectifiers of rolling mills]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 48–52.

7. Krubtsov, D.S., Khramshin, T.R., Kornilov, G.P. Sposoby upravleniya aktivnymi vypryamitelyami glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov [Active rectifiers control methods of main drive of rolling mills]. *Aktual'nye problemy*

sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya, 2013, no. 71, pp. 3–6.

8. Maklakov, A.S., Maklakova, E.A. Analiz elektromagnitnoy sovmestimosti 18-pul'snoy skhemy soedineniya trekhurovnevykh AVN pri ispol'zovanii metoda ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [EMC Analysis of 18-pulse connection circuit based on 3L-AFE with SHE PWM method]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 66–73.

9. Radionov, A.A., Maklakov, A.S., Tszin, Tao. Primenenie metoda roya chastits dlya opredeleniya uglov pereklyucheniya v algoritme shirotno-impul'snoy modulyatsii s udaleniem vydelennykh garmonik [Application of Particle Swarm method to determine the angle of switching using Selective Harmonic Elimination Technique PWM algorithm]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2019, no. 1(42), pp. 38–44.

10. Gasiyarov, V.R., Radionov, A.A., Maklakov, A.S. Modelirovanie trekhurovnevogo preobrazovatelya chastoty s fiksirovannoy neytral'yu pri algoritme ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM algorithm]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2017, no. 1(34), pp. 4–9.

11. Averin, S.V., Anisimova, T.V., Danilina, A.N., Kryuchkov, V.V., Sledkov, Yu.G. Sravnenie sposobov optimal'noy minimizatsii koeffitsienta garmonik i isklyucheniya garmonik s regulirovaniem napryazheniya dlya invertorov s mnogourovnevym vykhodnym napryazheniem [Comparison of methods of Optimal Output Ratio Minimization and Harmonic Elimination with Voltage Regulation for Multilayer Harmonic Inverters]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2010, no. 1(37), pp. 19–26.

12. Maklakov, A.S. Gibridnyy algoritm modulyatsii na osnove prostranstvenno-vektornoy ShIM i ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [Hybrid Algorithm of Modulation Based on SHE PWM and SVP WM]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 92–100. doi: 10.14529/power180112.

13. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G. Uluchshenie kachestva napryazheniya v elektricheskikh setyakh s aktivnymi vypryamitelyami za schet vybora optimal'nykh tablits uglov pereklyucheniya ShIM [Improvement of Voltage Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2019, no. 4(45), pp. 35–42. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42

14. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Antropova, L.I. Fearures of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for power quality analysis in internal power supply systems. Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, 2020, pp. 774–778. doi:10.1109/eiconrus49466.2020.9038988

15. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' silovoy skhemy glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov [Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 3–7.

УДК 62-05

Андрей Владимирович Аверченков
Брянский государственный технический университет, доктор технических наук, заведующий кафедрой компьютерных технологий и систем, Россия, Брянск, e-mail: mahar@mail.ru

Инна Евгеньевна Колошкина
АНО «Федеральный центр компетенций в сфере производительности труда», аспирант, руководитель проектов, Россия, Москва, e-mail: inna.koloshkina@yandex.ru

Сергей Александрович Шептунов
ФГБУН Институт конструкторско-технологической информатики РАН, доктор технических наук, генеральный директор, Россия, Москва, e-mail: ship@ikti.ru

Автоматизация нормирования операций производства изделий на оборудовании с ЧПУ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Автоматизация получения исходных данных и выполнения расчетов при технологической подготовке производства многократно повышает эффективность и качество решения проектных технологических задач. Составляющей частью технологической подготовки производства является определение нормативов времени и норм выработки. В процессе установившегося производства необходима оперативная информация об эффективности выполнения заданий различными категориями исполнителей и структурными подразделениями в целях принятия управленческих решений. При эксплуатации оборудования с программным управлением предоставляется возможность реализации автоматизированного сбора необходимой информации и расчета показателей.
Материалы и методы. В процессе исследования использован способ получения данных об эксплуатации оборудования непосредственно с устройств программного управления с последующей обработкой полученной информации на вычислительной платформе. Обработка результатов выполнена с использованием методов математической статистики, оценка результативности производства произведена по показателям общей эффективности *OEE* (*Overall Equipment Efficiency*).
Результаты. Для автоматизации нормирования, интеллектуальной поддержки процессов управления и обработки данных в технологических системах управления разработана методика сбора информации и расчета показателей при изготовлении изделий на станках с ЧПУ. На основании исходных данных, считываемых с устройств программного управления оборудования, на вычислительной платформе, реализованной по предложенным алгоритмам, определяются нормативы времени и нормы выработки при запуске производства новых изделий, а также критерии оценки эффективности установившегося производственного процесса. Для сравнительного анализа эффективности работы производственных подразделений за учитываемый период времени уточнен, применительно к обработке на станках с ЧПУ, показатель – среднее значение объема выпуска продукции за условную смену в нормо-часах.
Выводы. Опыт практического использования результатов исследования показал, что данный подход сокращает время технологической подготовки производства, обеспечивает повышение эффективности оперативного управления производством, а также предоставляет оперативную информацию для оценки процесса изготовления изделий на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, время машинное, время штучное, математическая статистика, математическое ожидание, нормы выработки, коэффициент загрузки оборудования, сравнительный анализ эффективности производства

Andrei Vladimirovich Averchenkov
Bryansk State Technical University, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Computer Technologies and Systems Department, Russia, Bryansk, e-mail: mahar@mail.ru

Inna Evgenievna Koloshkina
ANO «Federal Center of Competences in the Sphere of Workforce Productivity», Post Graduate Student, Project Supervisor, Russia, Moscow, e-mail: inna.koloshkina@yandex.ru

© Аверченков А.В., Колошкина И.Е., Шептунов С.А., 2020
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 6, с. 57–67.

Sergei Alexandrovich Sheptunov
Institute of Design and Technology Informatics of RAS, Doctor of Engineering Sciences, General Director, Russia, Moscow, e-mail: ship@ikti.ru

Automation of introduction of norms of working operations on CNC equipment

Abstract

Background. Automation of getting initial data and calculation for manufacturing preparation improves the efficiency and decision quality of design process tasks. An integral part of the manufacturing preparation is definition of time standards and production rates. In the process of manufacturing, operational information is needed to analyze the effectiveness of tasks performed by various categories of performers and structural divisions to make managerial decisions. During operation of equipment with software control, it is possible to implement automated gathering of necessary information and calculation of indicators.
Materials and methods. In the course of the research, the method was used to obtain information about the operation of the equipment directly from software control devices. Then obtained information was processed by the computing platform. The results were processed using mathematical statistics methods, and production performance was evaluated according to the overall equipment efficiency indicators (OEE).
Results. For automation of production, intellectual support of control processes and data processing in process control systems, the method of gathering information and calculating indicators during products manufacturing on CNC machines has been developed. Based on the initial data obtained from the equipment with software control, time standards and production rates when starting manufacturing new products are determined on a computing platform implemented using the algorithms proposed by the authors. Also, the criteria of evaluation of the effectiveness of the established production process are set. For a comparative analysis of the efficiency of the performance of production departments for the period taken into account, the authors specify the special indicator, i.e. the average value of the volume of output per a conditional shift per standard hour in relation to processing on CNC machines
Conclusions. The experience of practical application of the research results has shown that this approach reduces the time of manufacturing preparation, improves the efficiency of operational production management, and also provides operational information for evaluating the process of manufacturing products on CNC machines.

Key words: CNC machines, machine time, piece time, mathematical statistics, mathematical expectation, production rates, equipment load factor, comparative analysis of production efficiency

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.057-067

Состояние вопроса. Актуальность выполнения проведенных исследований обусловлена ростом масштабов работ по интенсификации и компьютеризации технологического производства, комплексной автоматизации и интегрированного управления сетью технологических процессов. Автоматизация получения исходных данных и расчетов при технологической подготовке производства (ТПП) многократно повышает эффективность и качество решения проектных технологических задач [1]. Составляющей частью ТПП при запуске производства новых изделий является определение нормативов времени и норм выработки. В процессе установившегося производства необходимы способы оперативного анализа эффективности выполнения производственных заданий различными категориями исполнителей и структурными подразделениями для принятия управленческих решений. Для выполнения расчетов норм времени и норм выработки при изготовлении каждой детали в процессе работы производится непосредственное наблюдение и фиксирование наблюдателем ряда показателей – времени работы оборудования при изготовлении каждой детали; числа деталей, выполненных за определенный отрезок времени; времени проведения наблюдений с последующими расчетами. Подготовка данных и выполнение расчетов связаны со значительными затратами времени, привлечением для решения этих задач квалифицированного персонала [2]. В целях повышения эффективности оперативного управления при эксплуатации оборудования с программным управлением предоставляется возможность реализации автоматизированного сбора необходимой информации и последующего расчета

нормативов времени и норм выработки [3–4]. Необходимо разработать методику экспресс-анализа, основанного на информационных возможностях устройств ЧПУ (УЧПУ), сокращающую время подготовки таких данных и не требующую привлечения для выполнения этих функций дополнительных человеческих ресурсов. Для оперативной оценки эффективности работы оборудования предоставляется возможность применить показатели, реализуемые с учетом информационных возможностей УЧПУ [5]. Также требует уточнения показатель, позволяющий оперативно производить сравнительный анализ работы операторов станков с ЧПУ, работающих в различных условиях.

Материалы и методы. В процессе исследования использованы способы получения сведений об эксплуатации оборудования непосредственно с устройств программного управления с последующей обработкой полученной информации на предложенной вычислительной платформе. Для выполнения расчетов и последующего анализа фиксируется информация, отражающаяся на экране монитора УЧПУ [1]:

– время работы по программе (*T*пр) – определяется по показаниям на мониторе УЧПУ в минутах при изготовлении детали по программе;

– показания счетчика на начало наблюдений (*N*1) – определяются по показаниям значений в штуках на мониторе УЧПУ;

– показания счетчика на конец наблюдений (*N*2) – определяются по показаниям значений в штуках на мониторе УЧПУ;

– время на начало наблюдений (*T*1час, *T*1мин) – фиксируется в часах и минутах;

– время на конец наблюдений (*T*2час, *T*2мин) – фиксируется в часах и минутах;

– время остановок оборудования на устранение неполадок (*T*3час, *T*3мин) – фиксируется в часах и минутах.

Все перечисленные значения используются для последующего расчета показателей и анализа.

Количество изготовленных деталей *N* в штуках за период наблюдений определяется по формуле

$$N = N2 - N1, \qquad (1)$$

где *N*1 – показания счетчика на мониторе УЧПУ на начало наблюдений; *N*2 – показания счетчика на мониторе УЧПУ на конец наблюдений.

Время наблюдения (*T*набл) в минутах определяется по формуле

$$T\text{набл} = (T2\text{час} \cdot 60 + T2\text{мин}) - [(T1\text{час} \cdot 60 + T1\text{мин}) + (T3\text{час} \cdot 60 + T3\text{мин})], \qquad (2)$$

где *T*1час, *T*1мин – время на начало наблюдений в часах и минутах; *T*2час, *T*2мин – время на конец наблюдений в часах и минутах; *T*3час и *T*3мин – время остановок оборудования на устранение неполадок в часах и минутах.

Обработка результатов выполнялась методами математической статистики, оценка результативности производства производилась по показателям общей эффективности оборудования *OEE* (*Overall Equipment Efficiency*).

Результаты. Для автоматизации производства, интеллектуальной поддержки процессов управления и обработки данных в технологических системах управления разработана методика расчета нормативов и показателей при изготовлении изделий на станках с ЧПУ. На основании исходных данных, считываемых с устройств программного управления оборудования, на вычислительной платформе определяются нормативы времени и нормы выработки при запуске производства новых изделий, а также критерии оценки эффективности установившегося производственного процесса (рис. 1).

Вычислительная платформа представляет последовательную цепь математических выражений вычисления показателей, на основе исходных данных получаемых с УЧПУ.

Машинное время (*T*маш) – для станков с ЧПУ отработка полного цикла по программе – определяется по показаниям на мониторе УЧПУ в целых и десятичных значениях минут (*T*пр) [4]:

$$T\text{маш} = T\text{пр}, \qquad (3)$$

где *T*пр – время работы по программе в минутах.

Штучное время (*T*шт) – время, затрачиваемое непосредственно на изготовление (обработку) единицы продукции, – включает в себя время машинное *T*маш, вспомогательное время *T*всп, время обслуживания *T*обсл, время перерывов и личные надобности *T*пер.

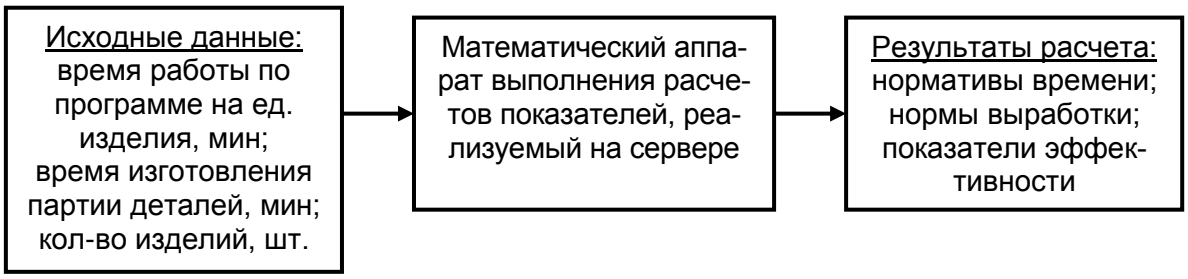


Рис. 1. Схема реализации исследований по определению показателей производства изделий на оборудовании с ЧПУ

Теоретически норму штучного времени можно рассчитать по формуле

Tшт = Tмаш + Tвсп + Tобсл + Tпер. (4)

Значения показателей (4) выбирается из нормативов. В нашем случае значение нормы штучного времени определяется экспериментально как соотношение времени наблюдения к количеству деталей, изготовленных за этот период:

Tшт = Tнабл / N (мин), (5)

где Tнабл – время наблюдения, мин, определяемое по (2); N – количество изготовленных деталей одного наименования, шт., за время наблюдений, определяемое по (1).

Так как значения штучного времени (Tшт) при мониторинге в разные дни и у разных операторов станков с ЧПУ могут разниться, то среднее значение штучного времени (Tшт) изготовления детали определяем методом математической статистики по результатам выборки и принимаем его как математическое ожидание случайных величин времени Tшт, зарегистрированных в ходе мониторинга [6].

Математическое ожидание, мин, M(Tшт) находится по формуле

M [Tшт] = $\sum xi*pi$, (6)

где xi – значения замеров Tшт, мин; pi – вероятность случайного события Tшт.

Вероятность pi случайного события Tшт определяется по формуле

pi [Tшт] = m/n. (7)

Дисперсия находится по формуле

D[Tшт] = $\sum xi^2*pi - M$[Tшт]^2. (8)

Среднее квадратическое отклонение $\sigma(x)$ определяется по формуле

σ(Tшт) = $\sqrt{D}$ [Tшт]. (9)

Коэффициент вариации определяется по формуле

$v = \sigma(x)/ M$ [Tшт]. (10)

Если при расчетах $v \leq 30$ %, то совокупность считается однородной, а вариация слабой. Полученное математическое ожидание значения Tшт принимается для дальнейших расчетов.

Для планирования выпуска изделий определяются нормы выработки в единицу времени. Норма выработки изготовления деталей в одну смену (Nсм шт/смену) длительностью в 8 часов на одном станке определяется по формуле

Nсм = 480/Tшт (шт/смену), (11)

где 480 – время в минутах в смене длительностью в 8 часов; Tшт – время изготовления одной детали в минутах.

Норма выработки изготовления деталей в час (Nчас шт/час) на одном станке определяется по формуле

Nчас = 60/Tшт (шт/ч), (12)

где 60 – время в минутах; Tшт – время изготовления одной детали в минутах.

Штучно-калькуляционное время (Tшк) – полное штучное время на изготовление единицы изделия (с учетом затрат подготовительно-заключительного времени (Tпз) на партию деталей N) – определяется по формуле

Tшк = Tшт + Tпз/ N, (13)

где Tшт – время изготовления одной детали в минутах; Tпз – подготовительно-заключительного времени в минутах на партию деталей (устанавливается по нормативам или определяется наблюдением); N – число деталей в партии в штуках при серийном производстве.

Расчеты по разработанной методике реализуются на персональном компьютере на вычислительной платформе, алгоритм расчета приведен на рис. 2.

Сравнительный анализ трудозатрат на привлечение квалифицированного персонала для определения нормативов времени и норм выработки для различных методов выполнения исследований при изготовлении изделий на оборудовании с ЧПУ приведен в табл. 1.

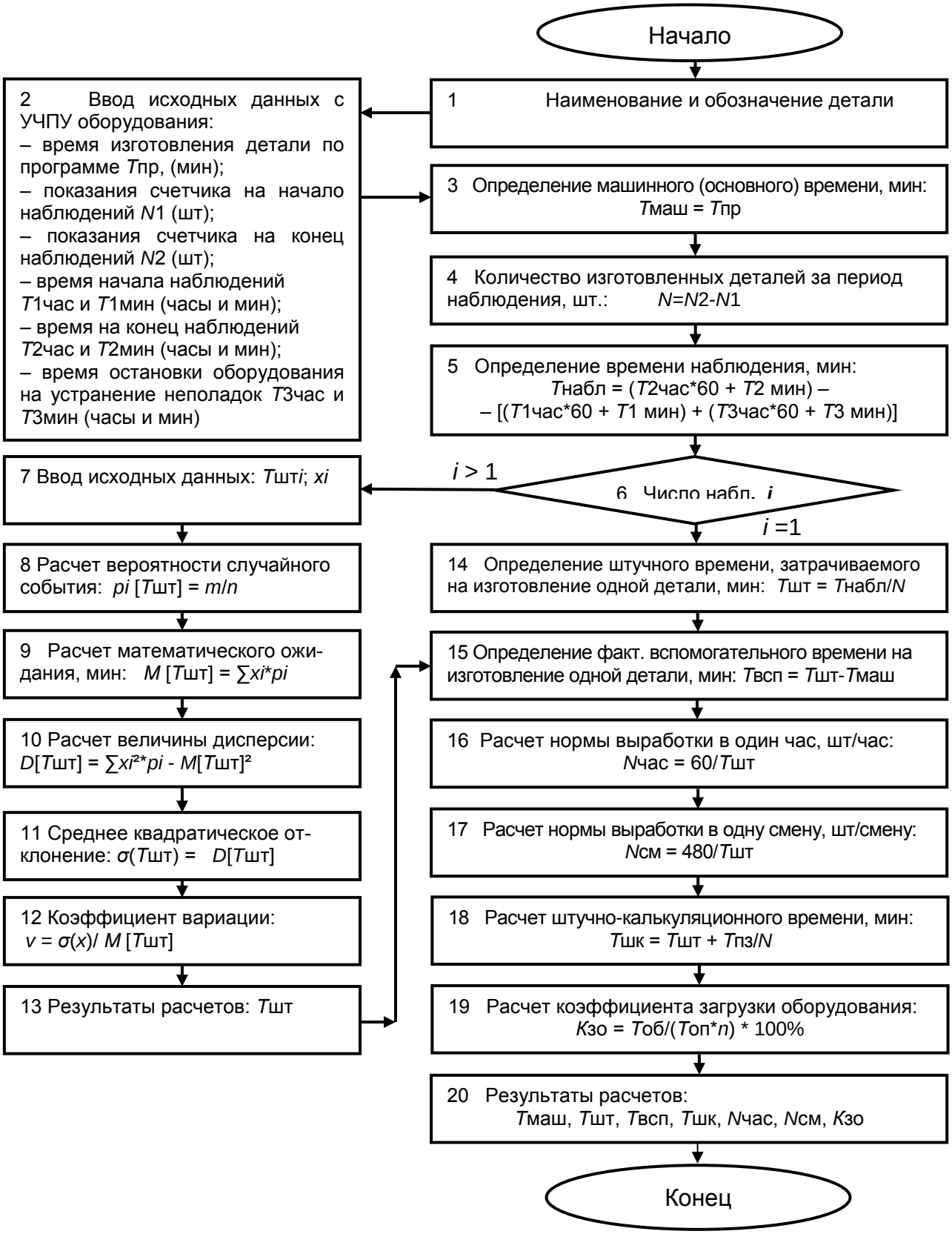


Рис. 2. Алгоритм расчета норм времени, норм выработки и показателей эффективности производства

Анализ полученных результатов (табл. 1) позволяет сделать следующие выводы: 1) применение автоматизированных способов определения нормативов времени и норм выработки при обработке на станках с ЧПУ позволяет сократить трудозатраты на привлечение квалифицированного персонала в 10–30 раз; 2) наличие локальной сети сокращает время автоматизированной подготовки выходных данных до 5 раз.

Таблица 1. **Сравнительный анализ вариантов трудозатрат определения нормативов времени и норм выработки при изготовлении изделий на оборудовании с ЧПУ**

№ п/п	Материальная база и вид исследований	Подготовка исходных данных на ПК	Получение информации для расчета	Регистрация результатов наблюдения	Ввод данных и расчет нормативов	Трудозатраты, % *Т*перс
1	2	3	4	5	6	7
1.	УЧПУ низкого уровня. Ручной режим замеров	В ручном режиме 5 % *Т*перс	Непосредственное наблюдение за выполнением работ 82 % *Т*перс	Фиксирование в листе наблюдений 8 % *Т*перс	Ручной ввод на ПК и расчет нормативов по программе 5 % *Т*перс	100 %
2.	УЧПУ среднего уровня, локальная сеть отсутствует. Автоматизированный режим замеров	С использованием баз данных 2 % *Т*перс	Информация отражается на мониторе УЧПУ после выполнения цикла работ 0 % *Т*перс	Фиксирование в листе наблюдений с монитора УЧПУ 8 % *Т*перс	Ручной ввод на ПК и расчет нормативов по программе 5 % *Т*перс	15 %
3.	УЧПУ высокого уровня, локальная сеть. Автоматизированные режим замеров и передача данных	С использованием баз данных 2 % *Т*перс	Информация отражается на мониторе УЧПУ после выполнения цикла работ 0 % *Т*перс	Автоматизированное фиксирование результатов наблюдений 0 % *Т*перс	Автоматизированный перенос данных на вычислительную платформу ПК. Расчет нормативов 1 % *Т*перс	3%

*Примечание. Т*перс – время непосредственного привлечения квалифицированного персонала для получения необходимых данных в нормо-часах.

При изготовлении изделий на станках с ЧПУ оператор обслуживает несколько станков, и расчет его заработной зарплаты выполняется с учетом коэффициента многостаночного обслуживания (*К*м) по формуле

$$З\text{ом} = \Sigma(T\text{шк} * Ni)/60 * K\text{м} * Ч\text{ст (руб)}, \quad (14)$$

где *Т*шк – штучно-калькуляционное время на единицу изделия, мин; *N* – число изделий одного наименования, шт.; *Ч*ст – часовая тарифная ставка, установленная для операторов в зависимости от разряда работ на предприятии, руб. в час; *К*м – коэффициент многостаночного обслуживания, определяемый по табл. 2.

Для оценки эффективности работы производства применялся известный в международной практике показатель *OEE* (*Overall Equipment Effectiveness*):

OEE = *Готовность* x *Производительность* x *Качество* x 100,

где *Готовность* – фактическое время работы оборудования/плановое время работы оборудования; *Производительность* – текущая выработка/запланированная выработка; *Качество* – количество качественных изделий/общее количество изделий.

Таблица 2. **Значения коэффициента многостаночного обслуживания** *К*м

Число обслуживаемых станков, *n*	1	2	3	4	5
*К*м	1	0,65	0,48	0,39	0,35

Для оценки эффективности работы производственного участка и каждого оператора за исследуемый период в категории *Готовность* (по показателю OEE), а также для сопоставления результатов используем показатель *Коэффициент загрузки оборудования* (*К*зо) как соотношение времени работы оборудования по изготовлению деталей (сумма *Т*маш изготовленных деталей за исследуемый период) и времени работы оператора за исследуемый период [1]. *Коэффициент загрузки оборудования* применительно к оборудованию с ЧПУ определяется по формуле

$$Кзо = (Тоб/Топ*n) * 100\ \%, \qquad (15)$$

где *Т*об – время работы *n* единиц оборудования, определяемое по количеству изготовленных деталей за исследуемый период, равное сумме произведений количества деталей одного наименования на *Т*маш этой детали, мин; *Т*оп – время работы оператора (участка) за исследуемый период времени, *Т*час * 60, мин; *n* – количество одновременно обслуживаемых оператором станков, шт.

Время работы всех единиц оборудования *Т*об за исследуемый период (смена, декада, месяц и т.п.) определяется как сумма произведений машинного времени и количества каждой изготовленной детали за этот период по формуле

$$Тоб = \Sigma Тмаш_i * N_i \text{ (мин)}, \qquad (16)$$

где *Т*маш*i* – время работы станка по программе при изготовлении одной *i*-й детали, мин; *Ni* – число деталей *i*-го наименования, изготовленных за исследуемый период времени.

Проект апробирован и реализован на одном из предприятий, производящих электротехнические изделия. Предложенная методика позволила проводить оперативный анализ эффективности работы операторов и участка в целом за любой временной отрезок – смену, сутки, декаду, месяц – для принятия управленческих решений. График анализа эффективности помесячной работы одного из производственных участков по показателю *Коэффициент загрузки оборудования* приведен на рис. 3. На первом этапе был выполнен расчет *К*зо, до проведения исследований он составлял менее 56 %. После проведения исследований, разработки и внедрения нормативов времени и норм выработки, что нашло отражение в сменно-суточных заданиях для операторов, *К*зо возрос до 80 % и более. Эти показатели близки к расчетным значениям, такой критерий по мировым стандартам должен приближаться к 90 % [7].

Операторы станков с ЧПУ в течение месяца работают различное количество смен, и сравнение эффективности их работы по показателям объемов изготовленной продукции за месяц некорректно.

Для объективной сравнительной оценки эффективности работы операторов станков с ЧПУ в категории *Производительность* (по показателю *OEE*) предлагается использовать показатель *Среднемесячное значение объема выпуска продукции за условную смену в нормо-часах* (*Т*смср). Этот показатель определяется по формуле

$$Тсмср = \Sigma Тшт_i * N_i/60*nсммес \text{ (нормо-часов)}, \qquad (17)$$

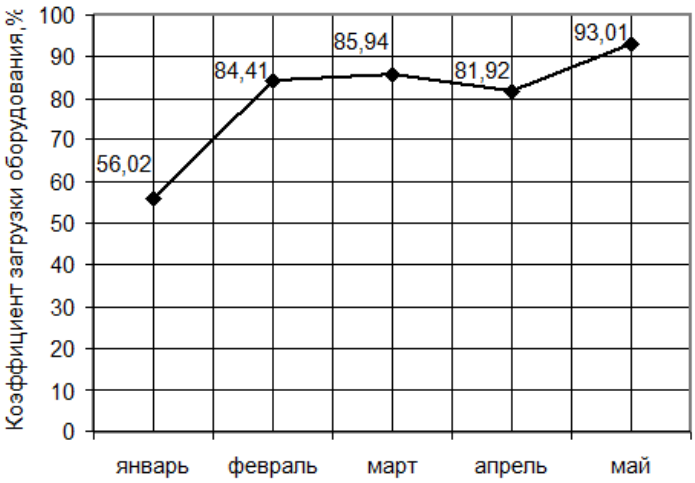


Рис. 3. Помесячный анализ эффективности работы участка станков с ЧПУ по показателю *Коэффициент загрузки оборудования* (*К*зо)

где *Т*шт*i* – время штучное на изготовление *i*-й детали, мин; *Ni* – количество *i*-х деталей, изготовленных за месяц, шт.; *n*смме с – количество смен, отработанных в течение месяца.

Пример реализации проведения анализа эффективности работы операторов по указанному выше показателю показан на рис. 4. В январе 2020 г. происходил запуск новых изделий, сменные задания операторам не выдавались и объемы выпуска были крайне низкие. С февраля месяца каждому оператору выдавались сменные задания на основе нормативов, разработанных по описанной выше методике, и эффективность выпуска изделий значительно повысилась, результаты отражает диаграмма на рис. 4.

Для определения показателя *Производительность* (по показателю *OEE*) полученное значение объема выпуска продукции в нормо-часах в пересчете на один станок сопоставляется с фондом времени за одну смену:

Производительность = (*Т*смср/*Т*оп**n*) *100 (%), (18)

где *Т*оп – время работы оператора за одну смену, ч; *n* – количество одновременно обслуживаемых оператором станков, шт.

В соответствии с мировыми стандартами, этот показатель должен приближаться к 95 % [7].

Расчет критерия *Качество* определяется соотношением количества годных изготовленных изделий к общему количеству изделий, выпущенных за этот период:

Качество = (*N*годн/*N*общ) *100 (%), (19)

где *N*годн – количество годных изготовленных изделий, шт.; *N*общ – общее количество изделий, выпущенных за исследуемый период, шт.

В соответствии с мировыми стандартами, этот показатель должен приближаться к 99 %, что в итоге дает для общего показателя *OEE* значение примерно 85 % [7]. Алгоритм расчета показателей эффективности производства приведен на рис. 5.

Процесс реализации проекта состоит из следующих этапов: фиксирование исходных данных на оборудовании; передача информации на вычислительную платформу; расчет нормативов времени и норм выработки; анализ эффективности по текущим результатам производства.

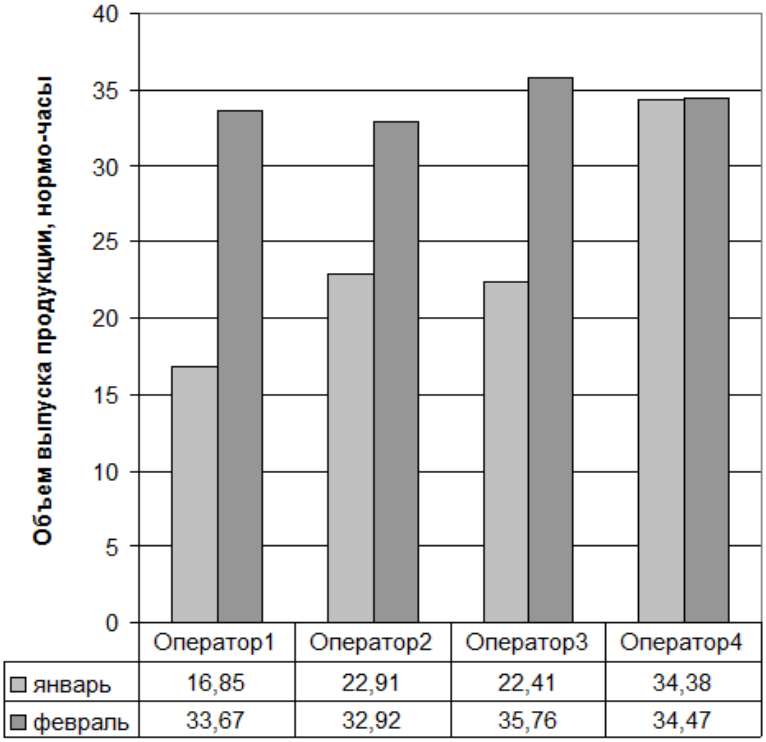


Рис. 4. Диаграмма эффективности работы операторов станков с ЧПУ по показателю *Объем выпуска продукции за условную смену*

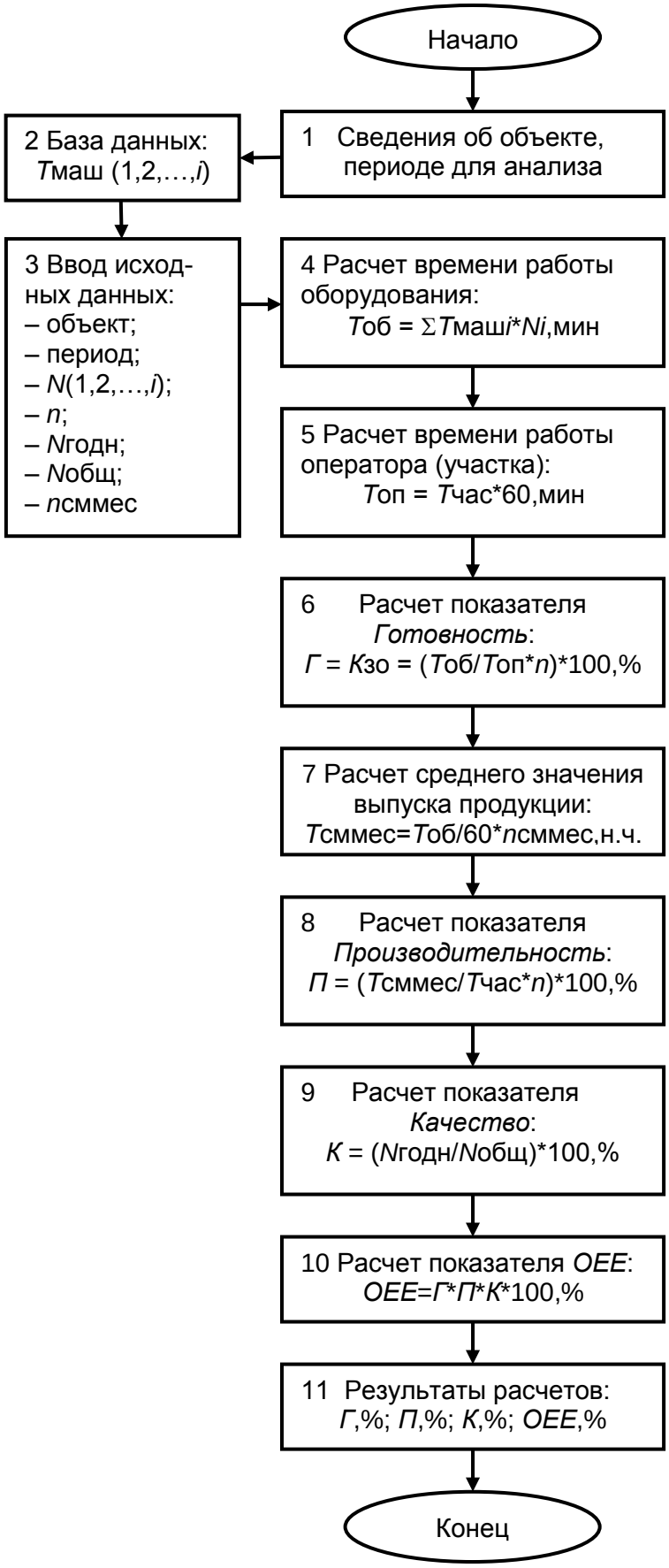


Рис. 5. Алгоритм расчета показателей эффективности производственной деятельности подразделений

При отсутствии на предприятии локальной сети (проводной или виртуальной) передачи информации и единого вычислительного центра исходная информация определяется непосредственным наблюдением на мониторе УЧПУ с занесением информации в специальный журнал. По полученным данным на автоматизированном рабочем месте, оснащенном персональным компьютером, на вычислительной платформе, после ручного ввода информации выполняются необходимые вычисления нормативов для дальнейшего использования в экономических расчетах.

При имеющейся на предприятии локальной сети, но отсутствии технической возможности считывать информацию непосредственно с УЧПУ станка оборудование укомплектовывается терминалами (например, система мониторинга «Диспетчер», производитель «Станкосервис», г. Смоленск), получающими информацию о состоянии станка и передающими сведения на сервер для дальнейшего анализа и расчета [8].

Современные ЧПУ высокого уровня (например, HEIDENHAIN и др.) позволяют передавать информацию о функционировании оборудования напрямую через локальную сеть на сервер для дальнейшего анализа и расчета [9]. Управляющая программа и сменное задание могут передаваться от диспетчера через сервер и локальную сеть прямо на УЧПУ станка. Схема движения информации приведена на рис. 6.

Выводы. В результате исследования разработана и апробирована методика автоматизации производства, интеллектуальной поддержки процессов управления и обработки данных, позволяющая оперативно, в автоматическом режиме, выполнять при запуске новых изделий расчеты фактических нормативов времени и норм выработки при механической обработке на станках с ЧПУ. Внедрение проведенных исследований позволяет сократить трудозатраты на привлечение квалифицированного персонала в 10–30 раз и время технологической подготовки производства на 43 %. Уточненный показатель *Коэффициент загрузки оборудования* позволяет выполнять сравнительный анализ эффективности работы участка станков с ЧПУ за учитываемый период времени. Уточненный применительно к оборудованию с ЧПУ показатель *Среднемесячное значение объема выпуска продукции за условную смену в нормо-часах* позволяет выполнять анализ эффективности работы каждого оператора за учитываемый период времени. Опыт практического использования результатов исследования показал, что данный подход способствует повышению эффективности процесса подготовки производства, а также предоставляет информацию для оценки процесса изготовления изделий на станках с ЧПУ и принятия управленческих решений по организации труда в производственном подразделении.

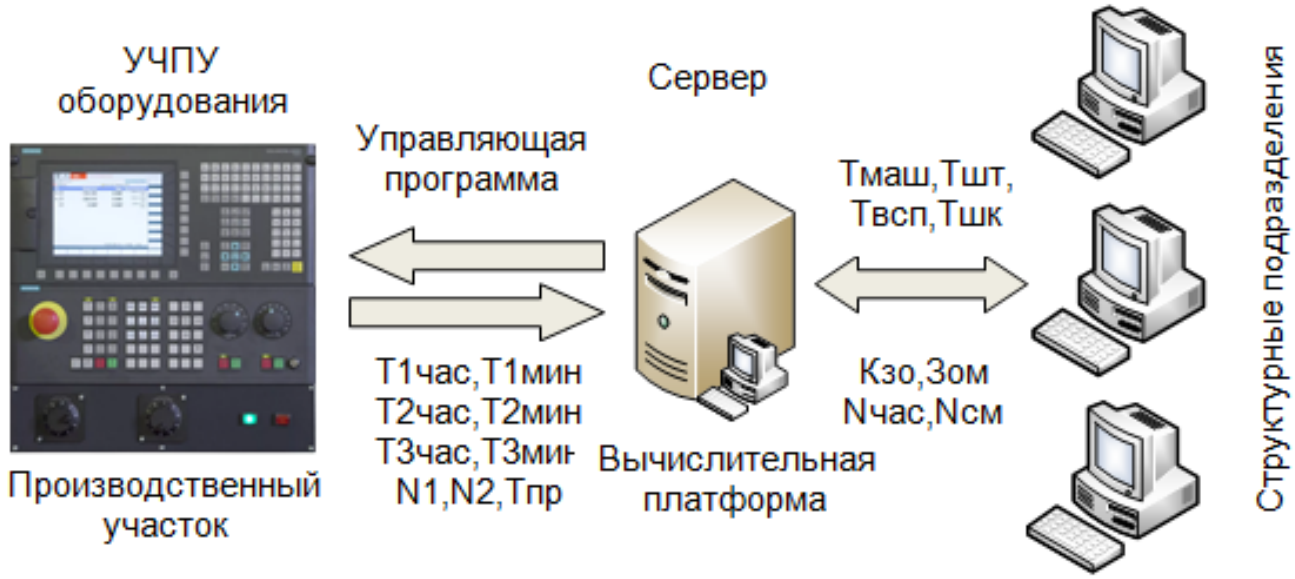


Рис. 6. Логистика движения информации при выполнении расчетов

Список литературы

1. **Побиянская А.В., Кипервар Е.А.** Влияние цифровизации на качество использования рабочего времени // Экономика труда. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 1169–1178.
2. **Современные** методы определения норм машинного и вспомогательного времени для металлорежущих станков с ЧПУ: справочник / В.Ф. Макаров, В.Р. Туктамышев, С.В. Масленков и др. // Инженерный журнал с приложением. – 2016. – № 2 (227). – С. 42–46.
3. **Севостьянова А.А., Ахвердян И.А., Штанкевич А.П.** Совершенствование методов управления процессами производства // Интеллектуальный потенциал XXI века: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2018. – С. 29–31.
4. **Аверченков А.В., Колошкина И.Е., Шептунов С.А.** Наукоемкая технология обработки заготовок на станках с ЧПУ и программирование в САМ-системе // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2019. – № 4(94). – С. 31–39.
5. **Колошкина И.Е.** Автоматизация разработки технологической документации // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2019. – № 1(173). – С. 56–62.
6. **Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.** Математическая статистика. – М.: КД Либроком, 2019. – 352 с.
7. **Итикава А., Такагаки И., Такэбэ Ю.** ТРМ в простом и доступном изложении / пер. с яп. А.Н. Стерляжникова; под науч. ред. В.Е. Растимешина, Т.М. Куприяновой. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2008. – 128 с.
8. **Система мониторинга «Диспетчер»** – мониторинг работы оборудования, станков с ЧПУ и автоматических линий: [сайт]. URL: http://www.intechnology.ru (дата обращения 26.10.2020)
9. **Колошкина И.Е.** Программирование УЧПУ HEIDENHAIN на программной станции с виртуальной клавиатурой // Проблемы современной науки и образования. – 2018. – № 11(131). – С. 34–39.

References

1. Pobiyanskaya, A.V., Kipervar, E.A. Vliyanie tsifrovizatsii na kachestvo ispol'zovaniya rabochego vremeni [Impact of digitalization on quality of operational time use]. *Ekonomika truda*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 1169–1178.
2. Makarov, V.F., Tuktamyshev, V.R., Maslenkov, S.V., Kataev, J.A., Glukhov, D.A. Sovremennye metody opredeleniya norm mashinnogo i vspomogatel'nogo vremeni dlya metallorezhushchikh stankov s ChPU [Modern methods of determination of machine time and auxiliary time for CNC cutting machine]. *Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2016, no. 2(227), pp. 42–46.
3. Sevost'yanova, A.A., Akhverdyan, I.A., Shtankevich, A.P. Sovershenstvovanie metodov upravleniya protsessami proizvodstva [Enhancement of manufacturing management methods]. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Intellektual'nyy potentsial XXI veka»*. Ufa, 2018, pp. 29–31.
4. Averchenkov, A.V., Koloshkina, I.E., Sheptunov, S.A. Naukoemkaya tekhnologiya obrabotki zagotovok na stankakh s ChPU i programmirovanie v SAM-sisteme [High-end technology of processing a workpiece on CNC machines and programming in EAM system]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2019, no. 4(94), pp. 31–39.
5. Koloshkina, I.E. Avtomatizatsiya razrabotki tekhnologicheskoy dokumentatsii [Automation of development of technical documentation]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*, 2019, no. 1(173), pp. 56–62.
6. Ivchenko, G.I., Medvedev Yu.I. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow: KD Librokom, 2019. 352 p.
7. Itikava, A., Takagaki, I., Takebe, Yu. *TRM v prostom i dostupnom izlozhenii* [TPM in layman's language]. Moscow: RIA «Standarty i kachestvo», 2008. 128 p.
8. *Sistema monitoringa «Dispetcher» – monitoring raboty oborudovaniya, stankov s ChPU i avtomaticheskikh liniy* [The “Dispatcher” monitoring system – monitoring of equipment, machines with CNC and automatic line]. Available at: http://www.intechnology.ru (data obrashcheniya 26.10.2020)
9. Koloshkina, I.E. Programmirovanie UChPU HEIDENHAIN na programmnoy stantsii s virtual'noy klaviaturoy [Programming conventional NC HEIDENHAIN at programming station with virtual keyboard]. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2018, no. 11(131), pp. 34–39.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 66.096.5

Андрей Васильевич Митрофанов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45; ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», научный сотрудник кафедры высшей и прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: and2mit@mail.ru

Вадим Евгеньевич Мизонов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45;
e-mail: mizonov46@mail.ru

Антон Николаевич Беляков
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Наталия Сергеевна Шпейнова
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: shpejnova@mail.ru

Разработка вероятностно-статистической модели расширения и аксиальной структуры псевдоожиженного слоя частиц антрацита[1]

Авторское резюме

Состояние вопроса. На многих стадиях приготовления и переработки дисперсного топлива частицы материала находятся в режиме псевдоожижения. Для характеристики механического контакта между потоком воздуха и одиночной частицей используется эффективный коэффициент ее сопротивления C_d. Величина эффективного коэффициента зависит не только от силы гидравлического сопротивления, но и учитывает влияние некоторого набора других сил. Указанный набор сил достаточно условен, поэтому в литературе для расчета коэффициента эффективного сопротивления можно встретить множество эмпирических зависимостей. Выбор подходящей зависимости является часто затруднительным, кроме того, он требует решения задачи об учете стесненного обтекания частицы. В связи с этим сравнительное исследование использования наиболее известных зависимостей для коэффициента сопротивления на основе единого метода учета стесненности потока является актуальным.
Материалы и методы. В качестве математической основы моделирования стесненного движения материала в псевдоожиженном слое используется теория цепей Маркова. Выполнена параметриче-

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00028.
The research is carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project №18-08-00028.

© Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Беляков А.Н., Шпейнова Н.С., 2020
Вестник ИГЭУ, 2020, вып. 6, с. 68–76.

ская идентификация модели и переходные матрицы поставлены в соответствие с физическими параметрами массопотоков, что делает предлагаемую модель нелинейной. Результаты численных экспериментов получены с использованием двух эмпирических зависимостей для коэффициента сопротивления частиц.
Результаты. Предложена вероятностно-статистическая модель формирования объема и аксиальной структуры псевдоожиженного слоя. Выполнен анализ двух сценариев формирования псевдоожиженного слоя при использовании различных эмпирических зависимостей для коэффициента сопротивления частиц. На основе теории цепей Маркова разработана и апробирована модель для описания формирования объема и аксиальной структуры псевдоожиженного слоя. Показана недостаточная однозначность физических моделей для определения коэффициента сопротивления частицы в стесненном потоке.
Выводы. Проведенные исследования подтвердили, что качественно непротиворечивое описание структурной неоднородности псевдоожиженного слоя возможно с использованием нелинейных математических моделей, основанных на мезомасштабном уровне декомпозиции объекта. Прогностическая эффективность подобных моделей лимитируется малой надежностью зависимостей для расчета коэффициента сопротивления одиночной частицы. Можно констатировать высокую актуальность дальнейших сравнительных исследований в целях проверки различных зависимостей для расчета коэффициентов сопротивления газ–частица с точки зрения обеспечения ими надежного прогноза высоты псевдоожиженных слоев.

Ключевые слова: кипящий слой, вектор состояния, переходная матрица, скорость витания частицы, твердое топливо

Andrey Vasilyevich Mitrofanov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45; Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Research Scientist of High and Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: and2mit@mail.ru

Vadim Evgenievich Mizonov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: mizonov46@mail.ru

Anton Nikolaevich Belyakov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Natalia Sergeevna Shpeynova
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: shpejnova@mail.ru

Development of stochastic model of particulate coal fluidized bed expansion and axial structure

Abstract

Background. Particulate solids are in the state of fluidization at many stages of preparation and treatment of solid fuels. An effective drag force coefficient C_d is used to describe a mechanical contact between gas stream and an individual particle. The evaluation of the effective drag force coefficient is not limited by the force of hydraulic resistance but also includes a set of different forces. This set of forces is rather indeterminate, and a lot of empirical equations for effective drag force coefficient calculations can be found in the scientific papers. Choosing the applicable formula for calculation is often difficult. In addition, it requires taking into account the flow patterns around an individual particle. Thus, a comparative study to examine the most well-known drag force models with a uniform approach to account the flow patterns around an individual particle is important.
Materials and methods. The Markov chain approach is used as a mathematical basis for modeling of the flow patterns in a fluidized bed. The identification of the model parameters is completed and the complementation of transition matrices with the current physical properties of substances involved into the flow makes the model non-linear. The comparative study of the results obtained with using of the two correlations for drag force coefficient is performed.
Results. The stochastic model of fluidized bed expansion and axial structure has been proposed. The comparative analysis of two different scenarios of fluidized bed expansion using different drag force models

has been performed. The authors developed and tested the model to describe fluidized bed expansion and axial structure on the basis of the Markov chain approach. The low certainty of physical drag coefficients models under conditions of flow patterns around an individual particle has been shown.
Conclusions. The conducted research proves that consistent description of structure inhomogeneity of fluidized bed is possible using the nonlinear mathematical models based on mesoscale level of the object decomposition. Predictive efficiency of similar models is limited by low reliability of formula for calculation of drag force coefficient. Thus, it is possible to state the importance of further comparative research to check different formulas for calculation of gas-particle drag force coefficient in order to provide a reliable forecast of the fluidized bed height.

Key words: fluidized bed, state vector, transition matrix, particle settling velocity, solid fuel

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076

Введение. Выработка электроэнергии и тепла в Российской Федерации в значительной мере осуществляется за счет природного газа (его доля в топливно-энергетическом балансе (ТЭБ) сохраняется на уровне порядка 50 % [1–2]). Подобная ситуация не может быть названа удовлетворительной в связи с тем, что, во-первых, природный газ является ценным ресурсом для химической технологии, во-вторых, стратегически значимым ресурсом, влияющим на финансово-экономические параметры внешнеэкономической деятельности страны. Планируемое снижение объемов потребления природного газа для удовлетворения энергетических нужд на внутреннем рынке закреплено в государственной программе «Энергетическая стратегия России до 2035 года» и предполагает расширение ее твердотопливной ниши и диверсификацию энергетики [2]. Вместе с тем продолжительность эксплуатации большей части функционирующих твердотопливных котлов (порядка 90 %) превысила 30 лет [3], что свидетельствует об их физическом и моральном устаревании. Опыт освоения новых котельных установок, использующих активные гидродинамические режимы контактирования частиц топлива с несущей средой (газом), показывает, что трудности во многом сопряжены с непригодностью существующих методик расчета, которые имеют крайне низкую прогнозирующую эффективность [3–5]. Последняя проблема особенно актуальна для расчетов котлоагрегатов пылеугольных энергоблоков, использующих технику псевдоожижения дисперсного топлива [4–5].

В то же время необходимо подчеркнуть, что подобная аппаратура представляет собой сложные открытые диссипативные системы с набором обратных связей, успех описания которых должен базироваться на построении адекватных физико-математических моделей входящих в них подсистем [5–7]. В отношении аппаратов с активными гидродинамическими режимами одной из базовых подсистем является гидромеханика реакционной зоны, без надлежащего описания которой невозможен переход к моделированию технологического преобразования дисперсного топлива.

Параметры полей скоростей и концентраций частиц в потоке несущей среды могут быть описаны с использованием различных методологических подходов. В наиболее простом случае объект моделирования представляется как единое целое, а затем ищется эмпирическое или полуэмпирическое его описания. Такой подход имеет низкую информативность, но быстрое время расчета. Получаемые результаты пригодны для описания конкретного объекта. Противоположный вариант анализа объекта подразумевает рассмотрение объекта как совокупности всех индивидуальных частиц, участвующих в процессе (например, метод дискретных элементов в сочетании с методами вычислительной гидродинамики). Использование такого подхода дает высокую информативность, но исключительно большое время расчета, что делает его практически неприемлемым для оптимизации, когда необходимо сравнивать расчетные варианты. Кроме того, использование такого подхода к расчету требует идентификации большого числа параметров моделей, количественная оценка части которых представляется невыполнимой. Описанные подходы реализуют некоторые предельные варианты декомпозиции объекта, достоинства и недостатки использования этих подходов рассмотрены в ряде обобщающих работ [5–7].

Необходимо отметить, что при численной реализации даже подходы, бази-

рующиеся на рассмотрении бесконечно малого объема, фактически оперируют с некоторыми малыми, но конечными размерами. В то же время многие исследователи указывают на необходимость перехода к промежуточным уровням моделирования [8–10]. Необходимость построения моделей на основе промежуточного (мезоскопического) масштаба декомпозиции системы продиктована не только соображениями экономии машинных ресурсов (эта трудность с развитием вычислительной техники может быть устранена), но и (в большей степени) невозможностью идентификации значительного числа параметров моделей, основанных на более детальном описании процесса. Кроме того, предельная степень декомпозиции часто противоречит качественному состоянию объекта (например, введение в рассмотрение представительного объема, который меньше размера частицы, противоречит физической природе взаимодействия газ–частица).

Для характеристики механического контакта между потоком воздуха и одиночной частицей используется эффективный коэффициент ее сопротивления C_d. Величина эффективного коэффициента зависит не только от силы гидравлического сопротивления, но и учитывает влияние некоторого набора других сил. Указанный набор сил достаточно условен, поэтому в литературе для расчета коэффициента эффективного сопротивления можно встретить множество эмпирических зависимостей. Выбор подходящей зависимости является часто затруднительным, кроме того, он требует решения задачи об учете стесненного обтекания частицы.

В связи с этим представляется актуальным анализ сценарных вариантов физического взаимодействия газового потока со слоем сыпучего материала в рамках единого мезоскопического подхода к построению модели.

Материалы и методы. Вычислительная база построения модели основана на использовании математического аппарата теории цепей Маркова для описания изменения (до достижения установившегося состояния) состояния ансамбля частиц и воздушного потока. Рабочее пространство подъемной колонны аппарата представляется набором из счетного числа n представительных объемов (ячеек) с идеальным смешением свойств. Указанные ячейки жестко связаны друг с другом и формируют цепь, которая характеризуется вектором состояния системы **S**. Процесс движения фаз слоя рассматривается в рамках одномерной задачи, и каждая ячейка характеризуется конечном размером Δx. Параметры векторов состояний фиксируются только в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – промежуток времени между соседними состояниями системы (шаг по времени); k – номер временного шага.

Вероятности всех возможных миграций фаз слоя из данной ячейки вдоль цепи записывают в стохастический вектор, который, таким образом, содержит вероятности для полной группы событий. Стохастический вектор, содержащий вероятности, относящиеся к j-й ячейке цепи, записывается в j-й столбец переходной матрицы, которая, таким образом, содержит вероятности всех событий, определяющих состояние системы через промежуток времени Δt, и является основным оператором модели.

С учетом этого продольное перемещение твердой и несущей фаз описывается рекуррентными матричными равенствами:

$$\mathbf{S}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^{k}\, \mathbf{S}_p^{k}; \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^{k}\, \mathbf{S}_g^{k} + \mathbf{S}_{gf}, \quad (2)$$

где $\mathbf{S}_p$ и $\mathbf{S}_g$ – векторы-столбцы объемного содержания частиц и агента сушки в ячейках соответственно; $\mathbf{P}_p^k$ и $\mathbf{P}_g^k$ – матрицы переходных вероятностей для частиц и газа, зависящие от векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе; $\mathbf{S}_{gf}$ – вектор поступления газа (при подаче через решетку он имеет единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему воздуха, подаваемому в нее за один временной переход).

В рассматриваемой модели для газовой фазы вводятся только вероятности перехода вперед (принята модель идеального вытеснения), поэтому переходная матрица формируется обычным для подобных моделей [9–10] образом и не описывается далее.

Для придания модели движения частиц по цепи прогностических возможностей необходимо поставить в соответствие элементам переходной матрицы $\mathbf{P}_p$ физические параметры взаимодействия газ–частица. Движение в подъемной колонне аппарата обусловлено действием на частицу в вертикальном направлении сил тяжести, Архиме-

да, силы гидродинамического сопротивления, а также силы механического взаимодействия от столкновений с другими частицами. Относительно легко может быть идентифицирована только сила тяжести, сила Архимеда часто полагается малозначимой в процессах газ–твердое, так как плотность твердых частиц оказывается на несколько порядков больше, чем плотность газовой фазы [9–11].

Попытки строгого учета ударных взаимодействий формируют отдельное направление исследований в механике взвесенесущих потоков и подробно описаны в [6–7], однако возникающие при этом задачи не позволяют проводить однозначную идентификацию всех параметров контактного взаимодействия. В связи с этим случайные по своей природе контактные силы определяются нами в терминах макродиффузии. При этом значения диффузионных вероятностей определяются по расчетной схеме, используемой ранее [9–11]. Указанная схема предполагает, что в произвольной ячейке коэффициент макродиффузии частиц зависит от их концентрации, которая, в свою очередь, определяется локальной скоростью движения несущей среды w (индекс-номер ячейки не приводится):

$$D = \frac{H_{fb}}{H_0}\frac{(w - W_0)}{K_D}, \qquad (3)$$

где H_{fb} и H_0 – высота слоя в псевдоожиженном и рыхлонасыпанном состоянии соответственно (значение H_0 рассчитывается при известной насыпной плотности материала, H_{fb} в начальный момент времени равна H_0, а для каждого следующего момента времени наблюдения рассчитывается с точностью, не превышающей размера ячейки, в соответствии с распределением материала вдоль цепи); W_0 – фиктивная (в свободном сечении аппарата) скорость несущей среды; K_D – эмпирический параметр модели, принятый равным 0,01.

Сила гидродинамического сопротивления, действующая на одиночную частицу, связана с ее весом P через соотношение [6–12]

$$P = C_d f_p \rho_g \frac{V_{si}^2}{2}, \qquad (4)$$

где C_d – коэффициент сопротивления одиночной частицы; f_p – площадь наибольшего поперечного сечения одиночной частицы, перпендикулярного вектору скорости; ρ_g – плотность ожижающей среды; V_s – скорость витания одиночной частицы.

Скорость витания V_s является одной из основных материальных констант в расчетах взвесенесущих потоков, фактически она представляет собой скорость несущей среды, при которой частица в потоке пребывает в равновесии. В предлагаемой модели доли частиц, которые за время наблюдения Δt покидают или не покидают ячейку, зависят от того, какова разница между скоростью потока в данной ячейке и скоростью витания частицы. Расчетные построения иллюстрирует рис. 1.

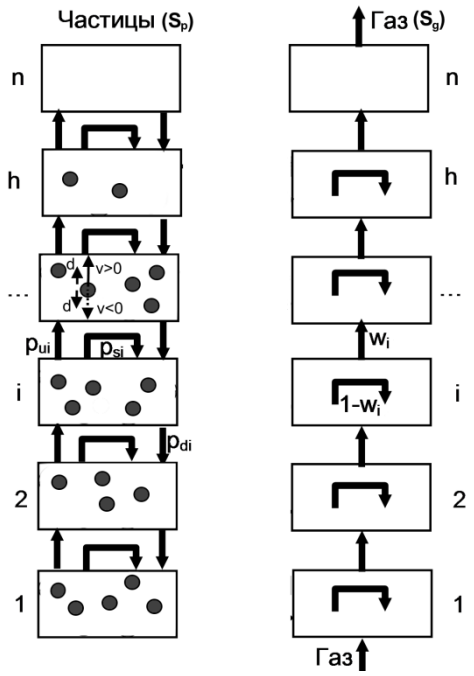


Рис. 1. Вычислительная схема модели периодического реактора с кипящим слоем

В рассмотрение введены вероятности перехода в соседнюю ячейку вниз (p_d), вверх (p_u) и вероятность остаться в наблюдаемой ячейке (p_s). Для i-й ячейки вероятности перемещения частиц p_{si}, p_{ui} и p_{di}, составляющие матрицу переходных вероятностей, связаны с параметрами процесса следующими соотношениями [9–11]:

$$p_{si} = 1 - p_{ui} - p_{di}; \qquad (5)$$

$$p_{di} = d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0; \qquad (6)$$

$$p_{di} = v_i + d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0; \qquad (7)$$

$$p_{ui} = v_i + d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0; \qquad (8)$$

$$p_{ui} = d_i \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0, \qquad (9)$$

где d – вероятность симметричных миграций из ячейки (диффузионная вероят-

ность), вводимая для учета влияния случайных факторов, обусловленных столкновениями частиц [9–11], связанная с коэффициентом макродиффузии D через соотношение

$$d = D\Delta t/\Delta x^2; \quad (10)$$

v – вероятность несимметричных миграций частиц из ячейки (конвективная вероятность),связанная с параметрами процесса как:

$$v = (w_i - V_{si})\Delta t/\Delta x, \quad (11)$$

Δx – высота ячейки.

Для идентификации V_s в настоящем исследовании использованы две зависимости, которые позволяют рассчитывать коэффициент сопротивления C_d как функцию числа Рейнольдса:

$$C_d = \frac{24}{\mathrm{Re}}\left(1 + 0{,}173 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}657}\right) + \frac{0{,}413}{16300 \cdot \mathrm{Re}^{-1{,}09}}; \quad (12)$$

$$C_d = \left(2{,}25 \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}31} + 0{,}36 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}06}\right)^{0{,}45}, \quad (13)$$

где Re – число Рейнольдса по диаметру частицы и относительной скорости ее обтекания. Зависимость (12) предложена в [12] для диапазона Re < $2{,}6 \cdot 10^5$, зависимость (13) предложена в [13] для диапазона Re < $3 \cdot 10^5$.

Зависимости (12)–(13) определяют параметры конвективного переноса твердой фазы вдоль цепи, при этом аэродинамические параметры частиц зависят не только от характерного размера зерен (диаметра), но и от режима фильтрации несжимаемой несущей среды, локальная скорость которой рассчитывается с учетом уменьшения живого сечения потока в ячейке в результате присутствия там частиц [9–11]:

$$w = \frac{W_0}{1 - \pi\left(C / 8 \cdot C_{\max}\right)^{2/3}}, \quad (14)$$

где C и $C_{\max}$ – текущее и максимальное (в плотном слое) значения объемной концентрация частиц в ячейке (индекс не приводится).

Зависимости (1)–(14) можно рассматривать как замкнутую в параметрическом отношении модель псевдоожижения в холодном реакторе псевдоожиженного слоя периодического принципа действия. В качестве модельного материала была использована навеска (5 кг) отсева антрацита (монофракция) с диаметром зерен d_p = 6 мм, истинной плотностью материала 1650 кг/м^3 и порозностью в рыхлонасыпанном состоянии 0,5. Численному анализу подвергнут сценарий ожижения навески материала в цилиндрической колонне высотой 2 м с внутренним диаметром 0,1 м.

Результаты. На рис. 2, 3 показаны базовые сценарии формирования объема и распределения концентрации частиц по высоте колонны. В процессе псевдоожижения свободная поверхность слоя испытывает колебания, характер которых зависит от режима движения несущей среды и свойств сыпучих частиц [6, 10]. В [9–11] показано, что расширение слоя, определяемое как среднее между максимальным и минимальным положениями свободной поверхности, может быть рассчитано с использованием чисто конвективной модели (без учета диффузионных вероятностей). При проведении численного эксперимента с использованием единого подхода к решению задачи описания обтекания одиночной частицы высота слоя зависит только от значения коэффициента сопротивления. Анализ результатов (рис. 2) показывает, что использование для идентификации предложенной ячеечной модели полуэмпирических зависимостей (12) и (13) приводит к получению сильно разнящихся результатов. Расчетные значения высоты псевдоожиженного слоя отличаются на 43 %.

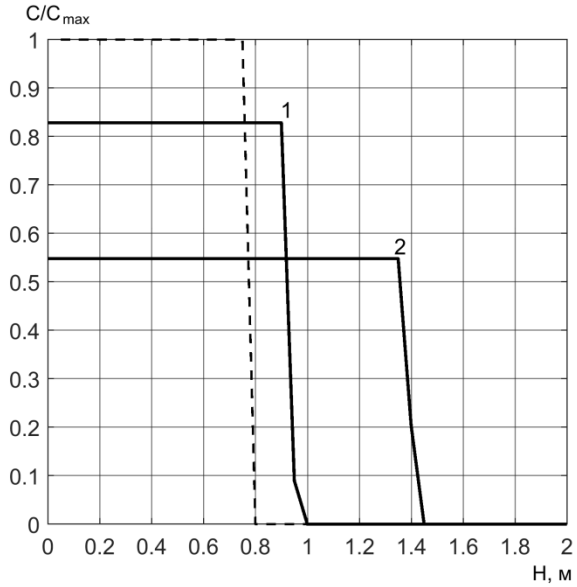


Рис. 2. Распределения относительного содержания твердой фазы по высоте аппарата, полученные при расчете по конвективной модели (при d = 0): пунктирная линия – плотный слой; сплошная линия – псевдоожиженный слой (1 – при использовании зависимости (12); 2 – при использовании зависимости (13))

Графики относительного содержания твердой фазы по высоте слоя, представленные на рис. 1, в качественном отношении не соответствуют современным представлениям о структуре псевдоожиженного слоя. Принято выделять нижнюю зону с относительно равномерной и высокой концентрацией частиц (плотная фаза слоя) и разбавленную фазу, в которой средняя концентрация ниже, а ее распределение характеризуется монотонным убыванием [6–7, 9].

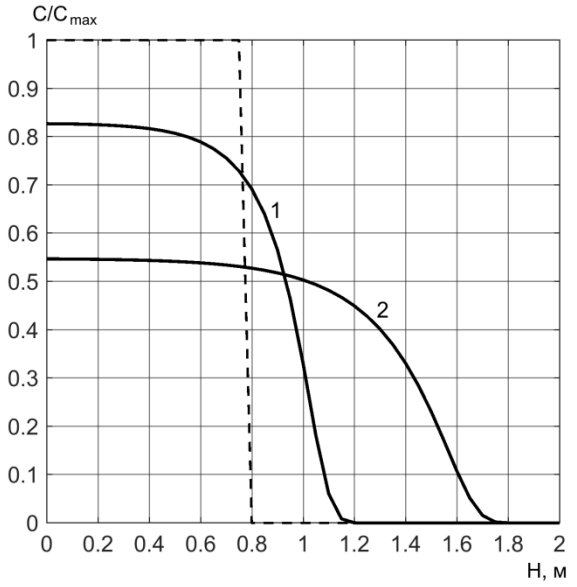


Рис. 3. Распределения относительного содержания твердой фазы по высоте аппарата, полученные при расчете по конвективно-диффузионной модели: пунктирная линия – плотный слой; сплошная линия – псевдоожиженный слой (1 – при использовании зависимости (12); 2 – при использовании зависимости (13))

Параметром модели, который отвечает за формирование более качественно-непротиворечивого распределения, а также учитывает наличие колебаний свободной поверхности, является коэффициент макродиффузии. Распределения, полученные при $D > 0$, показаны на рис 2. В качественном отношении результаты становятся лучше при любой используемой зависимости для коэффициентов сопротивления. Однако расхождение по высоте, занимаемой слоем, увеличивается еще больше (до 48 %), что вполне закономерно, так как коэффициент макродиффузии в конечном счете пропорционален относительной высоте слоя (зависимость (3)).

На рис. 4, 5 показаны расчетные данные, детализирующие результаты рис. 2, 3, а также характеризующие предложенный ячеечный подход в целом.

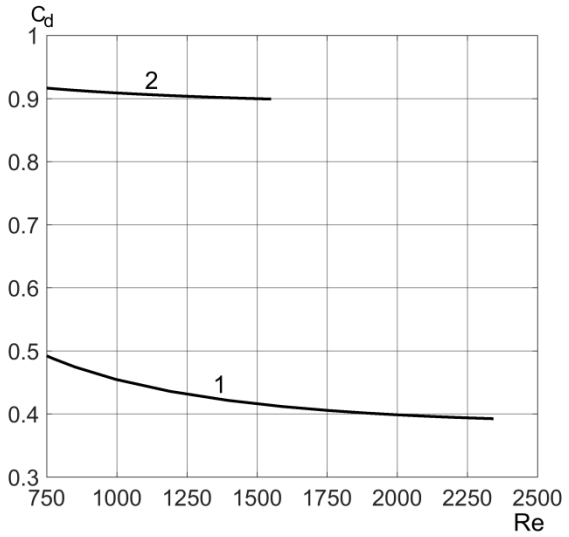


Рис. 4. Вид расчетных зависимостей C_d(Re) для полученных численно сценариев псевдоожижения: 1 – при использовании полуэмпирического соотношения (12); 2 – при использовании полуэмпирического соотношения (13)

На рис. 4 представлены значения коэффициентов сопротивления для исследованного гидродинамического режима. Следует отметить, что, несмотря на то, что расход воздух имеет постоянное значение, скорости обтекания (и диапазон чисел Рейнольдса) оказываются разными, так как при использовании разных полуэмпирических зависимостей C_d(Re) слой занимает разный объем и внутри него формируются различные условия обтекания частиц.

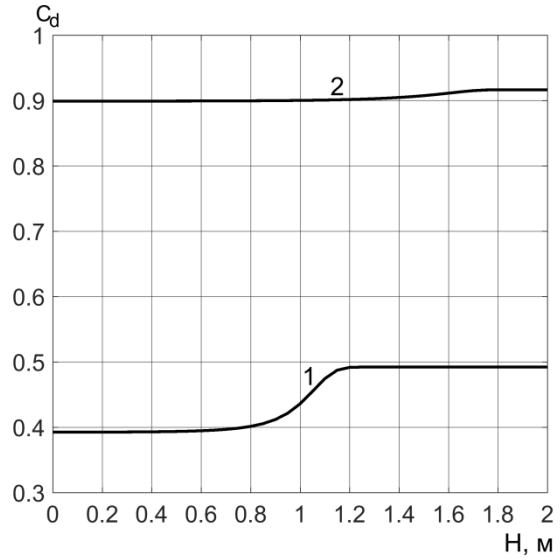


Рис. 5. Изменение значения C_d по высоте псевдоожиженного слоя для полученных численно сценариев псевдоожижения: 1 – при использовании полуэмпирического соотношения (12); 2 – при использовании полуэмпирического соотношения (13)

На рис. 5 показано распределение значений коэффициентов сопротивления по высоте колонны. Очевидно, что та гидромеханическая ситуация в слое, которая формируется при использовании зависимости (13), объясняется слабым (в сравнении с формулой (12)) влиянием значения аргумента Re на величину функции отклика C_d.

Выводы. Проведенные исследования подтвердили, что качественно непротиворечивое описание структурной неоднородности псевдоожиженного слоя возможно с использованием нелинейных математических моделей, основанных на мезомасштабном уровне декомпозиции объекта. В то же время показано, что прогностическая эффективность подобных моделей в основном лимитируется малой надежностью зависимостей для расчета коэффициента сопротивления одиночной частицы, так как коэффициент макродиффузии, который традиционно относится к трудно идентифицируемым параметрам движения дисперсных сред, имеет сравнительно малое влияние на расширение псевдоожиженного слоя. Кроме того, величина коэффициента макродиффузии зависит от концентрации частиц слоя, которая определяется, в свою очередь, принятой физической моделью трения газ–частица.

Таким образом, можно констатировать высокую актуальность дальнейших сравнительных исследований в целях проверки различных зависимостей для расчета коэффициентов сопротивления газ–частица с точки зрения обеспечения ими надежного прогноза высоты псевдоожиженных слоев.

Список литературы

1. **Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С.** Твердое композитное топливо из низкосортного сырья // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 56–64.
2. **Бушуев В.В., Безруких П.П.** Энергетическая стратегия России на период до 2030 года и ее приоритеты // Кабели и провода. – 2010. – № 3(322). – С. 10–13.
3. **Опыт** освоения современных котельных установок Российского производства / А.Н. Тугов, Г.А. Рябов, А.В. Штегман, М.Н. Майданик // Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 7–8. – С. 87–98.
4. **Инженерная** методика и численные результаты расчетов топки котлоагрегата с циркулирующим кипящим слоем / А.Ю. Майстренко, Б.Б. Рохамн, А.И. Топал и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 5. – С. 6–13.
5. **Coal** and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges / S. De, A.K. Agarwal, V.S. Moholkar, T. Bhaskar. – Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. – 521 p.
6. **Gidaspow D.** Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – San Diego: Academic Press, 1994. – 467 p.
7. **Multiscale** modeling of gas-fluidized beds / M.A. van der Hoef, M. Ye, M. van Sint Annaland, et. al. // Advances in chemical engineering. – 2006. – Vol. 31. – P. 65–149.
8. **From** Multiscale Modeling to Meso-Science / J. Li, W. Ge, W. Wang, et. al. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 484 p.
9. **Митрофанов А.В.** Математическая модель эволюции состояния слоя дисперсного топлива при нагреве и сушке в плотном и псевдоожиженном слое // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 67–70.
10. **A Markov** chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties / A.V. Mitrofanov, V.E. Mizonov, K. Tannous, L.N. Ovchinnikov // Particulate Science and Technology. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – P. 244–253.
11. **Митрофанов А.В., Касаткина Н.К., Рыжакова Я.С.** Расчетно-экспериментальное исследование влияния усадки материала на процесс его тепловой обработки в кипящем слое // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 49–54.
12. **Turton R., Levenspiel O.** A short note on the drag correlation for spheres // Powder Technol. – 1986. – Vol. 47. – P. 83–86.
13. **Khan A.R., Richardson J.F.** The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid // Chem. Eng. Commun. – 1987. – Vol. 62. – P. 135–150.

References

1. Tabakaev, R.B., Kazakov, A.V., Zavorin, A.S. Tverdoe kompozitnoe toplivo iz nizkosortnogo syr'ya [Solid composite fuel of low-grade raw (technological aspect)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii v energetike*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 56–64. (in Russian)
2. Bushuev, V.V., Bezrukikh, P.P. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda i ee prioritety [The Energy Strategy of Russia until 2030 and its priority]. *Kabeli i provoda*, 2010, no. 3(322), pp. 10–13. (in Russian)
3. Tugov, A.N., Ryabov, G.A., Shtegman, A.V., Majdanik, M.N. Opyt osvoeniya sovremennykh kotel'nykh ustanovok Rossiyskogo proizvodstva [Development experience of modern boiler installations made in Russia]. *Problemy energetiki*, 2018, vol. 20, no. 7–8, pp. 87–98. (in Russian)
4. Maystrenko, A.Yu., Rokhamn, B.B., Topal, A.I., Vyfatnyuk, V.G., Chernyavskiy, N.V. In-

zhenernaya metodika i chislennye rezul'taty raschetov topki kotloagregata s tsirkuliruyushchim kipyashchim sloem [The Engineering Calculation Method and Numerical Results of Calculation of Circulating Fluidized Bed Boiler]. *Energotekhnologii i resursosberezhenie*, 2010, no. 5, pp. 6–13. (in Russian)

5. De, S., Agarwal, A.K., Moholkar, V.S., Bhaskar, T. Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. 521 p.

6. Gidaspow, D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. San Diego: Academic Press, 1994. 467 p.

7. Van der Hoef, M.A., Ye, M., Annaland, M. van Sint, Andrews IV, A.T., Sundaresan, S., Kuipers, J.A.M. Multiscale modeling of gas-fluidized beds. *Advances in chemical engineering*, 2006, vol. 31, pp. 65–149.

8. Li, J., Ge, W., Wang, W., Yang, N., Liu, X., Wang, L., He, X., Wang, X., Wang, J., Kwauk, M. From Multiscale Modeling to Meso-Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 484 p.

9. Mitrofanov, A.V. Matematicheskaya model' evolyutsii sostoyaniya sloya dispersnogo topliva pri nagreve i sushke v plotnom i psevdoozhizhennom sloe [Mathematical model of state evolution of dispersed fuel bed under heating and drying in a dense fluidized bed]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 67–70. (in Russian)

10. Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E., Tannous, K., Ovchinnikov, L.N. A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties. *Particulate Science and Technology*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 244–253.

11. Mitrofanov, A.V., Kasatkina, N.K., Ryzhakova, Ya.S. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie vliyaniya usadki materiala na protsess ego teplovoy obrabotki v kipyashchem sloe [Theoretical and experimental study of the influence of particle shrinkage on the thermal treatment of particulate solids in fluidized bed]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 49–54.

12. Turton, R., Levenspiel, O. A short note on the drag correlation for spheres. *Powder Technol*, 1986, vol. 47, pp. 83–86.

13. Khan, A.R., Richardson, J.F. The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid. *Chem. Eng. Commun*, 1987, vol. 62, pp. 135–150.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 6

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ N 77-13527 от 20.09.02 г.

Подписано в печать 8.12.2020. Выход в свет 28.12.2020. Формат 60x84 $^{1}/_{8}$.
Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 9,62. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Ивановский государственный энергетический университет, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто», 153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.