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 2022 / Вып. 4

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Г.В. Ледуховский, д-р техн. наук (Иваново) (главный редактор)
И.К. Муравьев, канд. 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)
А.Б. Капранова, д-р физ.-мат. наук (Ярославль)
С.В. Клюнина, нач. УИУНЛ (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)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
А.В. Митрофанов, д-р техн. наук (Иваново)
А.Ю. Мурзин, канд. техн. наук (Иваново)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ю. Таршис, д-р техн. наук (Ярославль)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

Над номером работали:

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

О.Б. Колибаба, Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов, М.М. Чижикова. Разработка конструкции печи для утилизации твердых коммунальных отходов и исследование режимов ее работы.....**5**

В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, Н.А. Лоншаков, С.Г. Андрианов, М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса.....**14**

А.Я. Шелгинский, А.Г. Звончевский. Энергосбережение в производстве аммофоса на основе эффективного использования тепловых ВЭР-технологий.....**24**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

А.В. Манин, Д.Б. Вайнер. Система мониторинга параметров распределительной сети с корректирующим управлением на основе нейронной сети.....**35**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

А.И. Тихонов, А.А. Каржевин, А.Н. Голубев, А.В. Стулов. Имитационная модель силового трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом.....**46**

И.С. Полющенков. Разработка программного обеспечения электропривода для группового управления в электромеханической системе.....**53**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Затонский, И.С. Долгополов. Моделирование трехобмоточного силового трансформатора в Matlab Simulink.....**64**

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 2022 / Issue 4

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

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovsky, Doctor of Engineering (Ivanovo) (Chief Editor)
I.K. Muravyev, Candidate 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)
A.B. Kapranova, Doctor of Physics and Mathematics (Yaroslavl)
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)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.V. Mitrofanov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.Yu. Murzin, Candidate of Engineering (Ivanovo)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Yu. Tarshis, Doctor of Engineering (Yaroslavl)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

The issue is prepared by:

Responsible people for the issue:
E.N. Bushuyev, A.Yu. Murzin, A.I. Tikhonov,
A.R. Kolganov, 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

O.B. Kolibaba, D.A. Dolinin, R.N. Gabitov, M.M. Chizhikova. Development of furnace design to dispose municipal solid waste and study of its operation modes.....**5**

V.A. Gorbynov, S.S. Teplyakova, N.A. Lonshakov, S.G. Andrianov, M.N. Mechtaeva, P.A. Mineev. Methodology to assess impact of operational parameters on operation of turbine feed pump.....**14**

A.Ya. Shelginsky, A.G. Zvonchevsky. Energy saving issues in production of ammophos based on effective use of thermal SER technologies.....**24**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

A.V. Manin, D.B. Vyner. System of monitoring parameters of distribution grid with corrective control based on neural network.....**35**

ELECTROMECHANICS

A.I. Tikhonov, A.A. Karzhevin, A.N. Golubev, A.V. Stulov. Simulation model of three-phase power transformer with twisted shell-type magnetic circuit.....**46**

I.S. Polyuschenkov. Development of electric drive software for coordinated control in electromechanical system.....**53**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

A.V. Zatonskiy, I.S. Dolgopolov. Simulation of three winding power transformer in Matlab Simulink.....**64**

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 628.4.032

Ольга Борисовна Колибаба
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Денис Александрович Долинин
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Рамиль Наилевич Габитов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Мария Михайловна Чижикова
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант 2 курса, Россия, Иваново, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Разработка конструкции печи для утилизации твердых коммунальных отходов и исследование режимов ее работы

Авторское резюме

Состояние вопроса. Перспективным экологически безопасным термическим методом переработки твердых коммунальных отходов является пиролиз. Пиролиз позволяет получить комбинацию твердых, жидких и газообразных продуктов в различных пропорциях за счет изменения рабочих параметров процесса. Термическая переработка твердых коммунальных отходов осуществляется в специальных печах – термических реакторах. В настоящее время процессы пиролизной технологии Purox, Torrax Noell и др. реализованы на практике в различных конструкциях термических реакторов, имеющих свои достоинства и недостатки. К конструкции печи предъявляется ряд требований, таких как высокая производительность, экономичность в работе, обеспечение заданных технологических условий процесса и др. Проектируемая печь должна отвечать современным требованиям науки и техники в области теории тепломассообмена, гидродинамики и технической эстетики.
Материалы и методы. Исследования проведены с использованием методов физического и математического моделирования, программной системы конечно-элементного анализа ANSYS.
Результаты. По результатам физических и численных исследований получены значения КПД пиролизной печи при нагреве в ней твердых коммунальных отходов со скоростями 5, 10 и 15 ^{o}С/мин, на основании которых выбран рациональный режим работы установки, характеризующийся скоростью нагрева 10 ^{o}С/мин.

© Колибаба О.Б., Долинин Д.А., Габитов Р.Н., Чижикова М.М., 2022
Вестник ИГЭУ, 2022, вып. 4, с. 5–13.

Выводы. Применение пиролизной технологии утилизации твердых коммунальных отходов позволит сократить выбросы CO_2 на 17 % по сравнению с традиционным сжиганием. Предложенная конструкция пиролизной печи для утилизации предварительно подготовленных отходов способствует повышению энергетической эффективности процесса.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, пиролиз, пиролизная печь, тепловой баланс, ANSYS, декарбонизация

Olga Borisovna Kolibaba
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Denis Aleksandrovich Dolinin
Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Ramil Nailevich Gabitov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Maria Mikhailovna Chizhikova
Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Development of furnace design to dispose municipal solid waste and study of its operation modes

Abstract

Background. Pyrolysis is a promising environmentally friendly thermal method to process municipal solid waste (MSW). Pyrolysis makes it possible to obtain a combination of solid, liquid, and gaseous products in various proportions by changing the operating parameters of the process. Thermal processing of MSW is carried out in special furnaces, thermal reactors. At present, the processes of the pyrolysis technology Purox, Torrax Noell and others are carried out in thermal reactors of various designs that have their own advantages and disadvantages. The design of a furnace is to meet several requirements, such as high productivity, efficiency of operation, ensuring the specified technological conditions of the process, etc. The designed furnace is to meet modern requirements of science and technology in the field of heat and mass transfer theory, hydrodynamics, and technical aesthetics.
Materials and methods. The studies have been carried out using the methods of physical and mathematical modeling, the ANSYS software package of finite element analysis.
Results. Based on the results of physical and numerical studies, the values of the efficiency of the pyrolysis furnace have been obtained when MSW is heated at speeds of 5, 10 and 15 ^{o}C/min. Based on the results a rational operating mode of the installation has been chosen with a heating rate of 10 ^{o}C/min.
Conclusions. The use of pyrolysis technology for waste disposal will reduce CO_2 emissions by 17 % compared to traditional incineration. The proposed design of a pyrolysis furnace for the disposal of pre-prepared waste contributes to energy efficiency improvement of the process.

Key words: municipal solid waste, pyrolysis, pyrolysis furnace, heat balance, ANSYS, decarbonization

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.005-013

Введение. Рост потребления, особенно в крупных городах России, приводит к увеличению объемов образования коммунальных отходов. По данным Росприроднадзора, основной технологией утилизации таких отходов в нашей стране является их захоронение на полигонах, а также на санкционированных и несанкционированных свалках. Отходы при их бесконтрольном размещении на свалках негативно воздействуют на окружающую среду, являясь источником поступления вредных химических и биологических веществ в грунтовые и поверхностные воды, атмосферный воздух и почву, создавая угрозу здоровью и жизни населения. Влияние потока твердых коммунальных отходов (ТКО) сказывается на глобальных геохимических циклах ряда биофильных элементов, в частности органического углерода. Так,

масса этого элемента, поступающего в окружающую среду с отходами, составляет примерно 85 млн тон в год, в то время как общий естественный приток углерода в почвенный покров планеты составляет лишь 41,4 млн тонн в год [1].

Проблема организации промышленной переработки ТКО является актуальной для всех стран, в том числе и для Российской Федерации, из-за необходимости сокращения объемов захоронения отходов на полигонах по целому ряду причин: недостатка земельных площадей, транспортных расходов, экологической опасности, потере ценных компонентов и т.п. Именно промышленная переработка, учитывающая требования экологии, ресурсосбережения и экономики и решающая в совокупности вопросы обезвреживания, утилизации и ликвидации твердых отходов, представляет собой кардинальный путь решения проблемы ТКО [2].

Поскольку ТКО могут состоять на три четверти из органических компонентов, то целесообразна их утилизация термическими способами, одним из которых является пиролиз. Термическое обезвреживание отходов по технологии пиролиза заключается в их необратимом химическом изменении под действием повышенной температуры при отсутствии кислорода или при его незначительном количестве, в результате которого образуются пиролизный газ и твердый углеродистый остаток [3]. Преимущество пиролиза по сравнению с непосредственным сжиганием отходов заключается, прежде всего, в его эффективности с точки зрения предотвращения загрязнения окружающей среды [4]. Установки или заводы по переработке ТКО способом пиролиза функционируют в Дании, США, ФРГ, Японии и других странах [5, 6].

К числу наиболее важных инженерно-технических задач, подлежащих решению в целях дальнейшего развития и внедрения технологии пиролиза отходов, следует отнести создание эффективных пиролизных установок для их переработки. В настоящее время существуют разнообразные конструкционные решения пиролизных установок [7, 8, 9].

Любая пиролизная установка содержит набор технологического оборудования, главным элементом которого является реактор (печь) [10].

Предложена конструкция тоннельной печи для пиролизной переработки твердых коммунальных отходов, позволяющая повысить энергетическую эффективность процесса. Принципиальная схема печи показана на рис. 1.

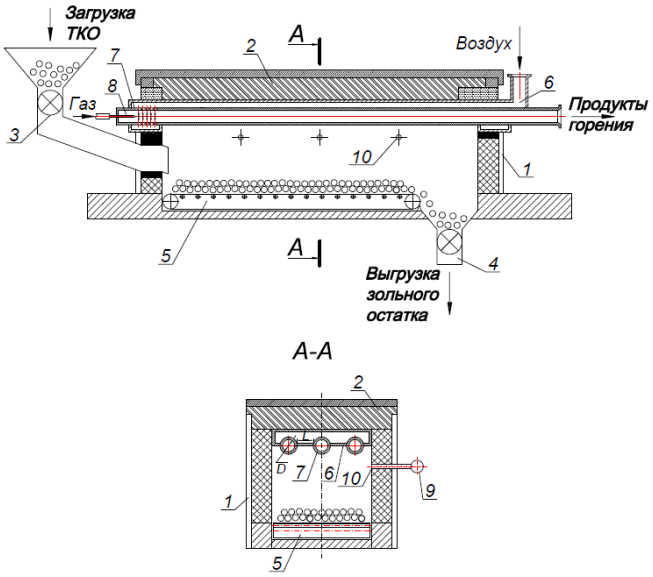


Рис. 1. Печь для термической переработки твердых коммунальных отходов: 1 – корпус; 2 – свод; 3 – устройство загрузки; 4 – устройство выгрузки зольного остатка; 5 – конвейер; 6 – рекуперативная камера; 7 – радиационные трубы; 8 – горелка; 9 – коллектор пиролизного газа; 10 – патрубки сбора пиролизного газа

Печь содержит металлический футерованный изнутри прямоугольный корпус с теплоизолированным плоским сводом. С одной стороны, установка снабжена устройством загрузки, оснащенным дозатором, с другой – устройством выгрузки зольного остатка. Транспортировка ТКО в течение всего производственного процесса осуществляется ленточным конвейером, обеспечивающим непрерывность технологического процесса термического разложения. Под сводом расположена металлическая рекуперативная камера, в которую встроены радиационные трубы [11]. Рекуперативная камера, заполненная воздухом, создает воздушную прослойку между теплоизолированным сводом и радиационными трубами, что позволяет существенно снизить тепловые потери от радиационных труб через свод и, следовательно, сократить расход топлива. Также при этом создаются потоки направленного теплового излучения на слой ТКО,

интенсифицирующие пиролиз отходов и повышающие энергетическую эффективность процесса. Организованные лучистые потоки направленного действия, воздействуя на слой ТКО, приводят к его термическому разложению с образованием газообразных продуктов (пирогаза) и твердого углеродистого остатка. Пирогаз удаляют из рабочего пространства печи с последующей подачей внешнему потребителю и использованием на собственные нужды установки (сжигание в радиационных трубах). Оставшийся на конвейерной ленте после проведения процесса твердый углеродистый остаток собирают для последующего использования в технологических целях.

Расчет теплового баланса печи проведен на основании экспериментальных и расчетных данных, представленных в [12, 13].

При составлении тепловых балансов принимались следующие допущения [14]:

1) масса углеродного остатка составляет не более 15 % от первоначальной массы ТКО (по результатам термогравиметрии);

2) перед подачей на сжигание пиролизный газ подвергается полной осушке.

Тепловой баланс рекуперативной камеры. Рекуперативная камера включает в себя радиационные трубы и расположенный над ними под сводом печи воздушный канал. В радиационные трубы подаются пиролизный газ ($G^{сж}_{пир.газ}$) и воздух, предварительно подогретый в воздушном канале ($G_{возд}$). Имеющие высокую температуру продукты горения ($G_{пг}$) обеспечивают тепловой поток через стенки радиационных труб в камеру пиролиза и в воздушный канал. Структура теплового баланса рекуперативной камеры представлена на рис. 2.

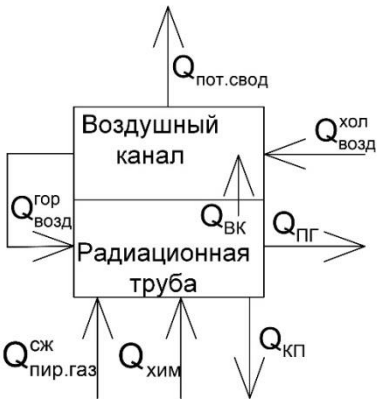


Рис. 2. Тепловой баланс рекуперативной камеры

Приходные статьи теплового баланса воздушного канала:

1) физическое тепло воздуха, кВт:

$$Q^{хол}_{возд} = G_{возд}\, c_{возд}\, t^{хол}_{возд}, \quad (1)$$

где $G_{возд}$ – расход воздуха, кг/с; $c_{возд}$ – удельная теплоемкость холодного воздуха, кДж/(кг·°С); $t^{хол}_{возд}$ – температура холодного воздуха, °С;

2) теплота, переданная через стенки радиационных труб в воздушный канал $Q_{ВК}$, кВт (определяется математическим моделированием).

Математическое моделирование теплообменных процессов в рекуперативной камере и камере пиролиза производили с использованием *CAE*-пакета конечно-элементного анализа *ANSYS* [14, 16].

На рис. 3 изображена геометрическая модель расчетной области рекуперативной камеры и камеры пиролиза.

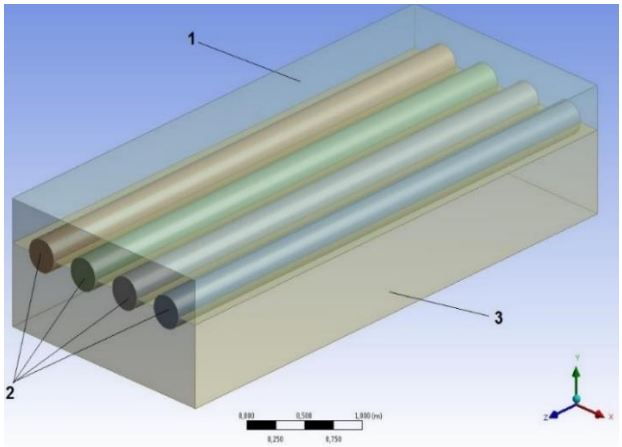


Рис. 3. Геометрическая модель расчетной области: 1 – воздушный канал; 2 – радиационные трубы; 3 – камера пиролиза

Для моделирования газодинамических и теплообменных процессов использовали CFD-модуль ANSYS Fluent. Задачу решали в стационарной постановке. В расчетах учитывали уравнения энергии, неразрывности и движения. Поскольку продукты горения пиролизного газа имеют температуру более 1700 °С, то дополнительно учитывали лучистый теплообмен. Турбулентность движения сред разрешалась с помощью *k*-ε модели. В качестве теплоносителей задавали продукты горения пиролизного газа и воздух с соответствующими теплофизическими свойствами. Граничные условия для дымовых газов и воздуха задавали массовыми расходами и

температурами на входе и давлением на выходе.

Разработанная модель позволила визуализировать поля скоростей, давлений и температур в различных сечениях и точках расчетной области и получить средние значения тепловых потоков и температур на выбранных поверхностях.

Результаты расчета температурных полей рекуперативной камеры и камеры пиролиза показаны на рис. 4.

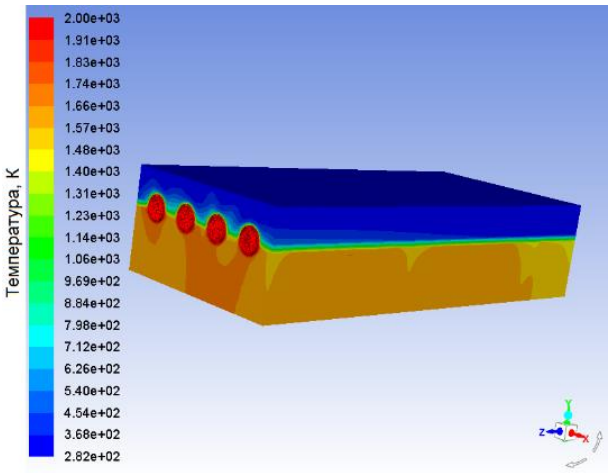


Рис. 4. Температурные поля воздушного пространства, радиационных труб и камеры пиролиза

Расходные статьи теплового баланса воздушного канала:

1) физическое тепло подогретого воздуха, кВт:

$$Q_{\text{возд}}^{\text{гор}} = G_{\text{возд}}\, c_{\text{возд}}\, t_{\text{возд}}^{\text{гор}}, \qquad (2)$$

где $G_{\text{возд}}$ – расход поступающего на горение воздуха, кг/с; $c_{\text{возд}}$ – удельная теплоемкость подогретого воздуха, кДж/(кг·°С); $t_{\text{возд}}^{\text{гор}}$ – температура подогретого воздуха, °С;

2) потери тепла в окружающую среду, принятые в количестве 5 % от суммы приходных статей баланса, кВт:

$$Q_{\text{пот.свод}} = 0{,}05\left(Q_{\text{возд}}^{\text{хол}} + Q_{\text{ВК}}\right). \qquad (3)$$

Приходные статьи теплового баланса радиационной трубы:

1) химическая теплота пиролизного газа, кВт:

$$Q_{\text{хим}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}\, Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \qquad (4)$$

где $G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$ – расход идущего на горение пиролизного газа, определяемый расчетом, кг/с; $Q_{н}^{p}$ – теплотворная способность пиролизного газа, кДж/кг;

2) физическая теплота пиролизного газа, кВт:

$$Q_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}\, c_{\text{пир.газ}}\, t_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}, \qquad (5)$$

где $c_{\text{пир.газ}}$ – удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг·°С); $t_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$ – температура поступающего в радиационную трубу пиролизного газа, °С;

3) физическая теплота подогретого воздуха $Q_{\text{возд}}^{\text{гор}}$, кВт (см. формулу (2)).

Расходные статьи теплового баланса радиационной трубы:

1) потери тепла с продуктами горения, кВт:

$$Q_{\text{ПГ}} = G_{\text{ПГ}}\, c_{\text{ПГ}}\, t_{\text{ПГ}}, \qquad (6)$$

где $G_{\text{ПГ}}$ – расход продуктов горения, кг/с; $c_{\text{ПГ}}$ – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С); $t_{\text{ПГ}}$ – температура, °С;

2) теплота, переданная через стенки радиационных труб в воздушный канал $Q_{ВК}$, кВт, определяется математическим моделированием;

3) теплоту, переданную из рекуперативной камеры в камеру пиролиза, определяем из уравнения теплового баланса рекуперативной камеры кВт:

$$Q_{\text{КП}} = Q_{\text{хим}} + Q_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}} + Q_{\text{возд}}^{\text{хол}} - Q_{\text{ПГ}} - Q_{\text{пот.свод}}. \qquad (7)$$

Тепловой баланс камеры пиролиза. В камеру пиролиза поступают предварительно подготовленные твердые коммунальные отходы ($G_{\text{ТКО}}$). Они частично окисляются кислородом (G_{O_2}) с выделением энергии и разлагаются, образуя пиролизный газ ($G_{\text{пир.газ}}$) и твердый углеродный остаток ($G_{\text{ТУО}}$). Схема тепловых потоков в зоне пиролиза представлена на рис. 5.

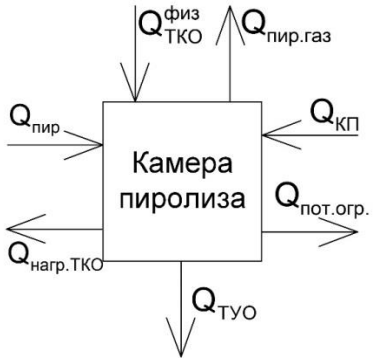


Рис. 5. Тепловой баланс камеры пиролиза в рабочем режиме

Приходные статьи теплового баланса камеры пиролиза:

1) физическое тепло ТКО, кВт:

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{физ}} = G_{\text{ТКО}}\, c_{\text{ТКО}}\, t_{\text{ТКО}}^{\text{вх}}, \quad (8)$$

где $G_{\text{ТКО}}$ – производительность установки по исходному сырью, кг/с; $c_{\text{ТКО}}$ – удельная теплоемкость ТКО на входе в зону пиролиза, кДж/(кг·°С); $t_{\text{ТКО}}^{\text{вх}}$ – начальная температура ТКО, °С;

2) теплота химических реакций чистого пиролиза и окисления ТКО, кВт:

$$Q_{\text{пир}} = G_{\text{ТКО}}\, q_{\text{пир}}, \quad (9)$$

где $q_{\text{пир}}$ – тепловой эффект пиролиза, определяемый экспериментально, кДж/кг;

3) тепло, переданное из рекуперативной камеры в камеру пиролиза, $Q_{\text{КП}}$ (расчет приведен в тепловом балансе рекуперативной камеры), кВт.

Расходные статьи теплового баланса рекуперативной камеры:

1) теплота, уносимая пиролизным газом из зоны пиролиза, кВт:

$$Q_{\text{пир.газ}} = G_{\text{пир.газ}}\, c_{\text{пир.газ}}\, t_{\text{пир.газ}}, \quad (10)$$

где $G_{\text{пир.газ}}$ – расход продуктов горения, кг/с; $c_{\text{пир.газ}}$ – удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг·°С); $t_{\text{пир.газ}}$ – температура пиролизного газа, °С;

2) теплота, уносимая твердым углеродным остатком из зоны пиролиза, кВт:

$$Q_{\text{ТУО}} = G_{\text{ТУО}}\, c_{\text{ТУО}}\, t_{\text{пир}}^{\text{кон}}, \quad (11)$$

где $G_{\text{ТУО}}$ – расход твердого углеродного остатка, кг/с; $c_{\text{ТУО}}$ – удельная теплоемкость твердого углеродного остатка, кДж/(кг·°С); $t_{\text{пир.кон}}$ – температура твердого углеродного остатка на выходе из камеры пиролиза, °С;

3) теплота, необходимая на нагрев ТКО, пиролизного газа и твердого углеродного остатка в процессе пиролиза, кВт:

$$\begin{aligned} Q_{\text{нагр.ТКО}} &= G_{\text{ТКО}}\, c_{\text{пир.ТКО}} \left(t_{\text{пир}}^{\text{нач}} - t_{\text{ТКО}}^{\text{вх}}\right) + \\ &+ G_{\text{пир.газ}}\, c_{\text{пир.газ}} \left(t_{\text{пир}}^{\text{кон}} - t_{\text{пир}}^{\text{нач}}\right) + \\ &+ G_{\text{ТУО}}\, c_{\text{ТУО}} \left(t_{\text{пир}}^{\text{кон}} - t_{\text{пир}}^{\text{нач}}\right), \end{aligned} \quad (12)$$

где $c_{\text{пир.ТКО}}$ – удельная теплоемкость ТКО, кДж/(кг·°С); $t_{\text{пир}}^{\text{нач}}$ – температура начала процесса пиролиза, °С; $t_{\text{пир}}^{\text{кон}}$ – температура окончания процесса пиролиза, °С;

4) потери тепла в окружающую среду, принятые в количестве 5 % от суммы приходных статей баланса, кВт:

$$Q_{\text{пот.огр}} = 0{,}05\left(Q_{\text{ТКО}}^{\text{физ}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{КП}}\right). \quad (13)$$

Уравнение теплового баланса камеры пиролиза имеет вид

$$\begin{aligned} &Q_{\text{ТКО}}^{\text{физ}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{КП}} = Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{ТУО}} + \\ &+ Q_{\text{нагр.ТКО}} + Q_{\text{пот.огр}}. \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 6 показана схема тепловых потоков во всей установке в целом.

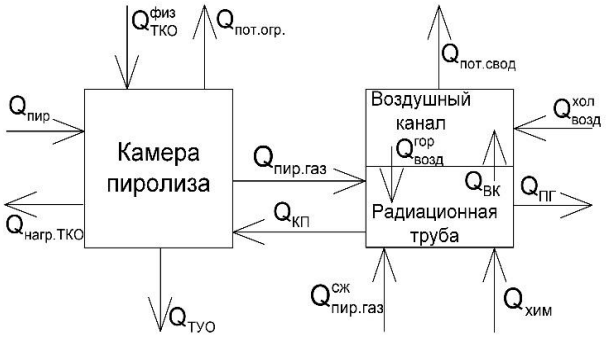


Рис. 6. Тепловой баланс установки

Для расчета термического КПД установки использована формула [17]

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q_{\text{пот.ТКО}}}{Q_{\text{хим}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{возд}}^{\text{хол}}}, \quad (15)$$

где $\sum Q_{\text{пот.ТКО}}$ – потери теплоты в процессе переработки ТКО, кВт:

$$\begin{aligned} \sum Q_{\text{пот.ТКО}} &= Q_{\text{ПГ}} + Q_{\text{ТУО}} + Q_{\text{нагр.ТКО}} + \\ &+ Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{пот.огр}} + Q_{\text{пот.свод}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Расчет теплового баланса и КПД установки при скоростях нагрева ТКО 5, 10 и 15 °С/мин производили для печи, имеющей следующие конструктивные характеристики:

– размеры рабочего пространства 5×2×0,7 м;

– высота слоя ТКО 0,5 м;

– емкость печи по ТКО 1000 кг;

– радиационная труба ∅324×4 мм;

– количество радиационных труб 4 шт.

Расчет выполнен по формулам (1)–(16) с использованием результатов исследований, представленных в [18].

В табл. 1 приведены основные результаты расчетов.

Таблица 1. **Расчетные параметры работы пиролизной печи**

Скорость нагрева ТКО, °С/мин	Теплота сгорания пиролизного газа $Q_н^р$, МДж/кг	Тепловой эффект пиролиза ТКО, кДж/кг	Температура горения пиролизного газа, °С	Термический КПД
5	17,98	7969	1960	0,48
10	14,39	8976	2060	0,51
15	12,68	1769	2116	0,26

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что максимальный КПД печи, равный 0,51, имеет место при скорости нагрева 10 °С/мин. Этот режим характеризуется наибольшим тепловым эффектом пиролиза. Увеличение скорости нагрева до 15 °С/мин приводит к значительному снижению КПД установки до 0,26.

В связи с тем, что в настоящее время важным направлением экологической политики развитых стран является декарбонизация экономики и энергетических систем, расчет экологического эффекта будем производить путем сравнения количества выбросов CO_2 для двух способов обращения с ТКО – сжигание и пиролиз в предложенной пиролизной печи [19].

Согласно данным [17], 1 т ТКО содержит 0,85 т углерода и при ее сжигании (полном окислении) образуется 1,76 т CO_2.

В случае пиролиза из 1 т ТКО образуется 15 % или 150 кг твердого углеродного остатка. По данным энергодисперсионного анализа [20] углеродный остаток содержит 66 % углерода. Таким образом, при переработке 1 т ТКО методом пиролиза в углеродном остатке будет содержаться 0,85·0,15·0,66 = 0,084 т углерода.

В пересчете на CO_2 это будет составлять 0,084·3,66 = 0,307 т.

Таким образом, использование пиролизной технологии позволит сократить выбросы CO_2 на 307 кг с каждой тонны исходных ТКО (табл. 2).

Таблица 2. **Сравнение выбросов CO_2 при сжигании и пиролизе ТКО**

Показатель	Сжигание ТКО	Пиролиз
Выход CO_2 на 1 т исходных ТКО, т	1760	1453

Выводы. Предложенная конструкция пиролизной печи для утилизации предварительно подготовленных ТКО с получением газообразного топлива повышает энергетическую эффективность процесса переработки.

По результатам расчета теплового баланса получены КПД пиролизной печи при нагреве ТКО со скоростями 5, 10 и 15 °С/мин, на основании которых предложен рациональный режим работы установки, характеризующийся скоростью 10 °С/мин.

Анализ результатов произведенного расчета сокращения выбросов диоксида углерода показывает, что применение пиролизной технологии позволит сократить выбросы CO_2 на 17 % по сравнению с традиционным сжиганием ТКО.

Список литературы

1. **Громова Н.Ю., Салова Т.Ю.** Техногенные системы и экологический риск. – СПб.: СПбГПУ, 2011. – 305 с.

2. **Березюк М.В., Румянцева А.В.** Новая система управления ТКО: инновационный подход // Инновационное развитие экономики: научно-практический и теоретический журнал. – 2016. – № 5(35). – С. 19–29.

3. **Basu P.** Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory // Academic Press, 30 Corporate drive. – Burlington, USA, 2010. – 365 p.

4. **Термические** процессы в технологиях переработки твердых бытовых отходов: аналитическая оценка и практические рекомендации / Л.Я. Шубов, Л.Г. Федоров, Р.В. Залепухин, В.Ф. Кроткова // ВИНИТИ, Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 1998. – № 5. – С. 33–97.

5. **Трушникова К.А.** Мировые тренды в организации услуг по утилизации твердых коммунальных отходов // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2019. – С. 138–141.

6. **Биомасса** как источник энергии: пер. с англ. / под ред. С. Соуфера, О. Заборски. – М.: Мир, 1985. – 386 с.

7. **Севрюкова Е.А., Пономаренко Н.В.** Технологические аспекты комплексной утилизации твердых бытовых отходов методом высокотемпературного пиролиза // Актуальные проблемы повышения эффективности производств микроэлектроники: сб. науч. тр. – М., 2016. – С. 71–77.

8. **Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И**. Анализ современных методов переработки твердых бытовых отходов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2015. – № 2. – С. 110–115.

9. **Киселев М.В. Шантарин В.Д.** Пиролиз углеродсодержащих отходов с получением топливных горючих газов // Известия вузов. Нефть и газ. – 2008. – № 3. – С. 117–119.

10. **Власов О.А., Мечев В.В.** Анализ работы печей сжигания отходов // Твердые бытовые отходы. – 2017. – № 8. – С. 40–43.

11. **Еринов А.Е., Семернин А.М.** Промышленные печи с радиационными трубами. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.

12. **Экспериментальное** исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов / О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, К.В. Аксенчик, В.А. Артемьева // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 14–19. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014-019.

13. **Экспериментальное** исследование процесса термической деструкции твердых коммунальных отходов / Д.А. Долинин, О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский, Р.Н. Габитов // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. симпозиума. Т. 1. – Киров: ФГБОУВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. – С. 182–186. DOI: 10.37816/eeste-2021-1-182-186.

14. **Kolibaba O.B., Sokolskiy A.I., Gabitov R.N.** Research of the pyrolysis of municipal solid waste aimed at improving the efficiency of thermal reactors // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2017. – Vol. 18, issue 2. – P. 147–160. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv. 2017020368.

15. **Основы** работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

16. **Каплун А.Б., Морозов Е.М., Шамраева М.А.** ANSYS в руках инженера: Практическое руководство // URSS. – 2016. – 272 с.

17. **Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Шехирев Д.В**. Технологии отходов. – М., 2006. – 410 с.

18. **Разработка** конструкции печи для утилизации твердых отходов и оценка эффективности ее работы / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский, А.В. Грошева // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 5. – С. 23–30.

19. **Глебова А.Г., Данеева Ю.О.** Адаптация российской энергетики к декарбонизации мировой экономики // Экономика. Налоги. Право. – 2021. – Т. 14, № 4. – Р. 48–55. DOI: 10.26794/1999-849X-2021-14-4-48-55.

20. **Колибаба О.Б., Долинин Д.А., Рузанов И.А.** Использование твердых продуктов пиролиза в теплотехнологии производства керамики // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XXI Бенардосовские чтения) 2–4 июня 2021 г., Иваново. В 3 т. Т. 2. – Иваново, 2021. С. 267–270.

References

1. Gromova, N.Yu., Salova, T.Yu. *Tekhnogennye sistemy i ekologicheskiy risk* [Technogenic systems and environmental risk]. Saint-Petersburg: SPbGPU, 2011. 305 p.

2. Berezyuk, M.V., Rumyantseva, A.V. Novaya sistema upravleniya TKO: innovatsionnyy podkhod [A new MSW management system: an innovative approach]. *Innovatsionnoe razvitie ekonomiki: nauchno-prakticheskiy i teoreticheskiy zhurnal*, 2016, no. 5(35), pp. 19–29.

3. Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, 30 Corporate drive. Burlington, USA, 2010. 365 p.

4. Shubov, L.Ya., Fedorov, L.G., Zalepukhin, R.V., Krotkova, V.F. Termicheskiye protsessy v tekhnologiyakh pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov: analiticheskaya otsenka i prakticheskiye rekomendatsii [Thermal processes in technologies for processing solid household waste: analytical assessment and practical recommendations]. *VINITI, Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchey sredy*, 1998, no. 5, pp. 33–97.

5. Trushnikova, K.A. Mirovye trendy v organizatsii uslug po utilizatsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov [World trends in the organization of services for the disposal of solid municipal waste]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Razvitie teorii i praktiki upravleniya sotsial'nymi i ekonomicheskimi sistemami»* [Materials of the Eighth International Scientific and Practical Conference “Development of the theory and practice of managing social and economic systems”]. Novokuznetsk, 2019, pp. 138–141.

6. Soufer, S., Zaborski, O. *Biomassa kak istochnik energii* [Biomass conversion processes for energy and fuels]. Moscow: Mir, 1985. 386 p.

7. Sevryukova, E.A., Ponomarenko, N.V. Tekhnologicheskie aspekty kompleksnoy utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov metodom vysokotemperaturnogo piroliza [Technological aspects of complex utilization of solid household waste by high-temperature pyrolysis]. *Sbornik nauchnykh trudov «Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti proizvodstv mikroelektroniki»* [Proceedings of research papers “Topical problems of improving the efficiency of microelectronics production”]. Moscow, 2016, pp. 71–77.

8. Gunich, S.V. Yanchukovskaya, E.V., Dneprovskaya, N.I. Analiz sovremennykh metodov pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov [Analysis of modern methods of processing solid household waste]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2015, no. 2, pp. 110–115.

9. Kiselev, M.V., Shantarin, V.D. Piroliz uglerodsoderzhashchikh otkhodov s polucheniem toplivnykh goryuchikh gazov [Pyrolysis of carbon-containing wastes with the production of fuel combustible gases]. *Izvestiya vuzov. Neft' i gaz*, 2008, no. 3, pp. 117–119.

10. Vlasov, O.A. Mechev, V.V. Analiz raboty pechey szhiganiya otkhodov [Analysis of the operation of waste incineration furnaces]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2017, no. 8, pp. 40–43.

11. Erinov, A.E., Semernin, A.M. *Promyshlennye pechi s radiatsionnymi trubami* [Industrial furnaces with radiant tubes]. Moscow: Metallurgiya, 1977. 280 p.

12. Kolibaba, O.B., Gabitov, R.N., Aksenchik, K.V., Artem'eva, V.A. Eksperimental'noe issledovanie okislitel'nogo piroliza tverdykh bytovykh otkhodov [Experimental study of oxidative pyrolysis of solid household waste]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 14–19. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014.

13. Dolinin, D.A., Kolibaba, O.B., Sokol'skiy, A.I., Gabitov, R.N. Eksperimental'noe issledovanie protsessa termicheskoy destruktsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Experimental study of the process of thermal destruction of solid municipal waste]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma «Povyshenie energoresursoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti protsessov i apparatov khimicheskoy i smezhnykh otrasley promyshlennosti»* [Proceedings of research papers of international scientific and technical academic conference “Improving the energy and resource efficiency and environmental safety of processes and devices in the chemical and related industries”]. Kirov: RGU im. A.N. Kosygina, 2021, issue 1, pp.182–186. DOI: 10.37816/eeste-2021-1-182-186.

14. Kolibaba, O.B., Sokolskiy, A.I., Gabitov, R.N. Research of the pyrolysis of municipal solid waste aimed at improving the efficiency of thermal reactors. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017, vol. 18, issue 2, pp. 147–160. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017020368.

15. Fedorova, N.N., Val'ger, S.A., Danilov, M.N., Zakharova, Yu.V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Fundamentals of work in ANSYS 17]. Moscow: DMK Press, 2017. 210 p.

16. Kaplun, A.B., Morozov, E.M., Shamraeva, M.A. *ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of an engineer: A practical guide]. URSS, 2016. 272 p.

17. Shubov, L.Ya., Stavrovskiy, M.E., Shekhirev, D.V. *Tekhnologii otkhodov* [Waste technologies]. Moscow, 2006. 410 p.

18. Gabitov, R.N., Kolibaba, O.B., Sokol'skiy, A.I., Grosheva, A.V. Razrabotka konstruktsii pechi dlya utilizatsii tverdykh otkhodov i otsenka effektivnosti ee raboty [Development of the design of the furnace for the disposal of solid waste and evaluation of the effectiveness of its work]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 5, pp. 23–30.

19. Glebova, A.G., Daneeva, Yu.O. Adaptatsiya rossiyskoy energetiki k dekarbonizatsii mirovoy ekonomiki [Adaptation of the Russian energy sector to the decarbonization of the global economy]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*, 2021, vol. 14, no. 4, pp. 48–55. DOI: 10.26794/1999-849X-2021-14-4-48-55.

20. Kolibaba, O.B., Dolinin, D.A., Ruzanov, I.A. Ispol'zovanie tverdykh produktov piroliza v teplotekhnologii proizvodstva keramiki [The use of solid pyrolysis products in the heat technology of ceramic production]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXI Benardosovskie chteniya) 2–4 iyunya 2021 g., Ivanovo. V 3 t., t. 2* [Proceedings of international scientific and technical conference “Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies (XXI Benardos Readings). In 3 vol., vol. 2]. Ivanovo, 2021, pp. 267–270.

УДК 620.9, 519.2

Владимир Александрович Горбунов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail:gorbynov.w@mail.ru

Светлана Сергеевна Теплякова
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Никита Андреевич Лоншаков
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: nik-lon@mail.ru

Сергей Геннадьевич Андрианов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: asg@iff.ispu.ru

Мария Николаевна Мечтаева
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Павел Алексеевич Минеев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса

Авторское резюме

Состояние вопроса. Турбопитательные насосы являются одними из основных потребителей тепловой энергии на собственные нужды ТЭС и АЭС. В настоящее время большое внимание уделяется повышению эффективности эксплуатации турбопитательных насосов. Для этого необходимо провести оценку влияния их эксплуатационных параметров, которая связана с обработкой большого массива данных. Решением этой проблемы является разработка методики, которая позволяет выполнить количественную и качественную оценку эксплуатационных параметров турбопитательных насосов.
Материалы и методы. В качестве исходных данных использованы 20 термодинамических и гидравлических параметров, регистрируемых во время промышленной эксплуатации оборудования турбопитательных насосов, и уравнения тепловых балансов для нахождения основных показателей эффективности работы турбопитательных насосов. Для обработки данных использован комплекс многомерных статистических методов – кластерный и факторный анализ в программном пакете Statistica.
Результаты. Разработана методика оценки влияния параметров на эффективность работы турбопитательных насосов. Методом кластерного анализа выполнена диагностика и получена классификация исследуемых параметров. Методом факторного анализа выделен ряд параметров: расход питательной воды в трубопроводе за турбопитательным насосом; перепад давления воды на турбопитательном насосе; расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами; перепад давления циркуляционной воды до и после конденсатора турбопитательного насоса; температура конденсата приводной турбины. Анализ результатов показал, что выявленные параметры являются основными составляющими полезной мощности турбопитательного насоса и критериев эффективности его работы.
Выводы. Предложенная методика позволяет провести количественную и качественную оценку эксплуатационных параметров турбопитательных насосов, решить задачу обработки больших массивов информации, снизить время и трудоемкость расчетов. Полученные на основе разработанной методики результаты могут применяться для построения статистической модели с использованием нейросетевых технологий. Данная методика может быть выбрана для оценки работы технологических систем и подсистем на ТЭС и АЭС.

Ключевые слова: термодинамические параметры, гидравлические параметры, метод кластерного анализа, метод факторного анализа, турбопитательный насос

© Горбунов В.А., Теплякова С.С., Лоншаков Н.А., Андрианов С.Г., Мечтаева М.Н., Минеев П.А., 2022
Вестник ИГЭУ, 2022, вып. 4, с. 14–23.

Vladimir Alexandrovich Gorbynov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbynov.w@mai.ru

Svetlana Sergeevna Teplyakova
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Nikita Andreevich Lonshakov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nik-lon@mail.ru

Sergey Gennadievich Andrianov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: asg@iff.ispu.ru

Maria Nikolaevna Mechtaeva
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Pavel Alekseevich Mineev
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

Methodology to assess impact of operational parameters on operation of turbine feed pump

Abstract

Background. Turbine feed pumps (TFP) are one of the main consumers of thermal energy for in-house needs of thermal power plants and nuclear power plants. Currently, much attention is paid to improve the efficiency of operation of turbine feed pumps. Thus, it is necessary to assess the impact of operational parameters. The problem is that it is necessary to process a large array of data. The solution to the problem is the development of a methodology that allows quantitative and qualitative assessment of operational parameters.
Materials and methods. As initial data, the authors have used the data of 20 thermodynamic and hydraulic parameters recorded during the industrial operation of the TFP equipment and the equations of thermal balances to find the key performance indicators of the TFP. A complex of multidimensional statistical methods is used for data processing, i.e cluster and factor analysis in the Statistica software package.
Results. A methodology to assess the impact of parameters on the operation efficiency of the TFP has been developed. The cluster analysis method is used to diagnose and classify the parameters under study. By the method of factor analysis, several parameters have been identified: feed water flow in the pipeline behind the TFP, differential pressure of water of the TFP, condensate flow in the pipeline behind the TFP condensate pumps, pressure drop of circulating water before and after the TFP condenser, condensate temperature of the drive turbine. The analysis of the results has showed that the identified parameters are the main components of the useful power of the turbine feed pump and the criteria for the efficiency of the TFP.
Conclusions. The proposed methodology makes it possible to carry out a quantitative and qualitative assessment of operational parameters, solve the problem of processing large amounts of information, reduce the time and complexity of calculations. The results obtained are based on the developed methodology and can be used to design a statistical model using neural network technologies. This methodology can be chosen to evaluate the operation of technological systems and subsystems at thermal power plants and nuclear power plants.

Key words: thermodynamic parameters, hydraulic parameters, cluster analysis method, factorial analysis method, turbine feed pump

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.014-023

Введение. Основным направлением стратегии развития теплоэнергетики России в настоящее время является увеличение выработки электроэнергии ТЭС и АЭС. При этом актуальной задачей становится повышение эффективности работы технологического и энергетического оборудования, технических и гидравлических систем, электрических сетей, предприятий энергетики, энергосистемы и т.д.

Для этого необходимо провести оценку и анализ влияния эксплуатационных параметров на работу реального оборудования. Проблема состоит в том, что необхо-

димо обработать большой массив данных с множеством переменных и выявить их закономерности. Она решается применением многомерных статистических методов обработки результатов [1, 9–11]. Перспективными методами признаны кластерный [1–4] и факторный анализ [5, 6–8].

Целью нашего исследования является разработка методики оценки влияния эксплуатационных параметров на эффективность работы турбопитательного насоса (ТПН) на основе опытных данных в условиях эксплуатации.

Турбопитательные насосы на ТЭС и АЭС являются одними из основных потребителей тепловой энергии на собственные нужды станции и предназначены для прокачки питательной воды на нужды энергоблока.

Турбопитательный насос включает комплекс оборудования:

- паровую приводную турбину;
- предвключенный (бустерный) насос;
- питательный насос;
- конденсатор приводной турбины;
- конденсатный электронасос;
- редуктор.

Для выполнения поставленной цели решаются следующие задачи:

- обработка данных пассивного промышленного эксперимента по работе ТПН;
- анализ внутренних закономерностей процессов работы турбопитательного насоса;
- выполнение параметрического диагностирования работы ТПН с помощью многомерных статистических методов анализа (кластерного и факторного);
- определение параметров, существенно влияющих на эффективность работы ТПН;
- оценка результатов, полученных многомерными статистическими методами анализа.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных параметров использовались 20 термодинамических и гидравлических параметров (табл. 1), регистрируемых в процессе промышленной эксплуатации турбопитательного насоса штатными контрольно-измерительными приборами на ТЭС и АЭС.

Для проведения расчетов использовались эксплуатационные данные во временном диапазоне с 1 ноября 2020 г. по 25 марта 2021 г. с интервалами между замерами 5 минут. Размер выборки данных составил 41760 значений.

Таблица 1. **Список основных параметров для турбопитательного насоса энергоблока**

Наименование параметра, единица измерения	Диапазон измерения
Давление пара перед главной паровой задвижкой (ГПЗ) ТПН, МПа	0,37 – 0,44
Давление пара перед стопорным клапаном ТПН, МПа	0,36 – 0,43
Температура пара перед ГПЗ ТПН,°С	167,44 – 255,19
Расход конденсата в трубопроводе за конденсатными ТПН, $м^3$/с ($м^3$/ч)	0,013 – 0,015 (46,26 – 55,74)
Температура конденсата за эжекторами, °С	35,25 – 40,38
Температура конденсата приводной турбины, °С	36,06 – 41,63
Давление пара за регулирующим клапаном (РК) ТПН, МПа	0,12 – 0,22
Температура пара на выхлопе турбины ТПН, °С	33,25 – 39,06
Уровень конденсата в конденсаторе ТПН, мм	27,15 – 57,12
Давление паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН, кПа	4,00 – 5,00
Температура паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН, °С	30,19 – 37,06
Давление пара на уплотнение турбины ТПН, МПа	0,08 – 0,08
Давление пара на эжекторы ТПН от редукционно-охладительной установки (РОУ) и деаэраторов	0,58 – 0,61
Температура пара на эжекторы ТПН от редукционно-охладительной установки (РОУ) и деаэраторов, °С	162,56 – 162,56
Температура пара в коллекторе уплотнений, °С	159,44 – 166,00
Перепад давления циркуляционной воды до и после конденсатора ТПН, кПа	50,98 – 57,70
Разность температур охлаждающей воды до и после конденсатора ТПН,°С	5,69– 8,19
Температура питательной воды на входе в предвключенный насос ТПН,°С	164,75 – 164,75
Перепад давления питательной воды на насосе ТПН, МПа	6,64 – 7,44
Расход питательной воды в трубопроводе за питательным насосом ТПН, $м^3$/с ($м^3$/ч)	0,54 – 0,97 (1953,71 – 3486,66)

В качестве зависимой целевой функции могут быть приняты различные критерии эффективности работы турбопитательного насоса:

- удельный расход теплоты на турбину, определяемый количеством потраченной тепловой энергии, необходимой для подачи питательной воды (кДж/(кВт·ч));
- удельный расход пара на турбину, определяемый расходом пара (кг/ч), необходимого для подачи питательной воды (кг/(кВт·ч));
- КПД турбины при номинальной нагрузке, определяемый отношением полезной мощности питательного насоса к потребляемой мощности тепловой энергии приводной турбины (%);
- удельный расход тепловой энергии брутто на приводную турбину в расчете на килограмм питательной воды (кДж/кг);
- общая потребляемая мощность тепловой энергии приводной турбины (кВт).

Применительно к ТПН в качестве критерия эффективности работы может выступать термодинамический КПД установки (%), который учитывает эффективность работы всего агрегата в целом без необходимости выявления КПД его составных частей [12].

В соответствии с выбранными для анализа параметрами работы ТПН, в качестве целевой функции выбрана полезная мощность $N_п$ турбопитательного насоса:

$$N_п = Q\Delta p = Q\rho g H, \quad (1)$$

где Q – производительность насоса, м^3/ч; Δp – перепад давления на насосе, Па; H – напор, м; ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м^3.

Обработка полученной информации проводилась в 3 этапа на основе многомерных статистических методов с помощью программного продукта Statistica.

Первый этап – факторный анализ [1, 5]. Применение факторного анализа сводится к приведению множества переменных к меньшему количеству факторов, каждый из которых объединяет сходные по смыслу первичные переменные.

Первым действием факторного анализа является выделение определенного количества основных наиболее значимых факторов на основании критерия «каменистой осыпи» и критерия Кайзера (значимыми признаются факторы, собственное значение которых больше 1).

Вторым действием анализа является вычисление матрицы коэффициентов корреляции для всех исходных переменных, которое проводится с помощью метода главных компонент. Под коэффициентом корреляции понимается показатель вероятностной связи между переменными, измеренными количественно.

Третьим действием проводится вращение факторов в целях создания более простой структуры, в которой большое значение факторной нагрузки каждой переменной соответствует только по одному фактору и малое – по остальным факторам.

Четвертым действием проводится интерпретация факторов и определяется структура их взаимосвязей с исходными переменными.

Второй этап – кластерный анализ методом иерархической (древовидной) кластеризации [1, 9]. Кластерный анализ представляет собой класс методов, используемых для классификации объектов или событий в относительно однородные группы, которые называют кластерами. При этом реализуется последовательное объединение в кластер сначала самых близких, а затем и все более отдаленных друг от друга элементов.

Результатом кластеризации является иерархическое дерево. Правилом объединения в кластеры выбран метод одиночной связи, а тип близости между кластерами – Евклидово расстояние.

Евклидово расстояние – геометрическое расстояние $A(x,y)$ в многомерном пространстве. Оно вычисляется следующим образом:

$$A(x,y) = \left[\sum_i \left(x_i - y_i\right)^2\right]^{1/2}. \quad (2)$$

Третий этап – кластерный анализ методом K-средних [1, 4], целью которого является классификация объектов в заданное количество кластеров. Метод основан на минимизации суммы квадратов расстояний между каждым элементом исходных данных и центром его кластера. В этом методе задается число кластеров, полученное на основании предыдущего исследования – метода иерархической кластеризации.

Результаты исследования. Факторный анализ. Для определения скрытых признаков (факторов) использован метод главных компонент факторного анализа.

В ходе работы выявлены параметры, которые имеют малую дисперсию и исключены из проведения факторного анализа:

- давление пара на уплотнение турбины ТПН;
- температура пара на эжекторы ТПН от РОУ и деаэраторов;
- температура питательной воды на входе в предвключенный насос ТПН.

Распределение величин собственных значений факторов отображено на графике рис. 1. Собственное значение представляет величину дисперсии переменных, учитываемых этим фактором.

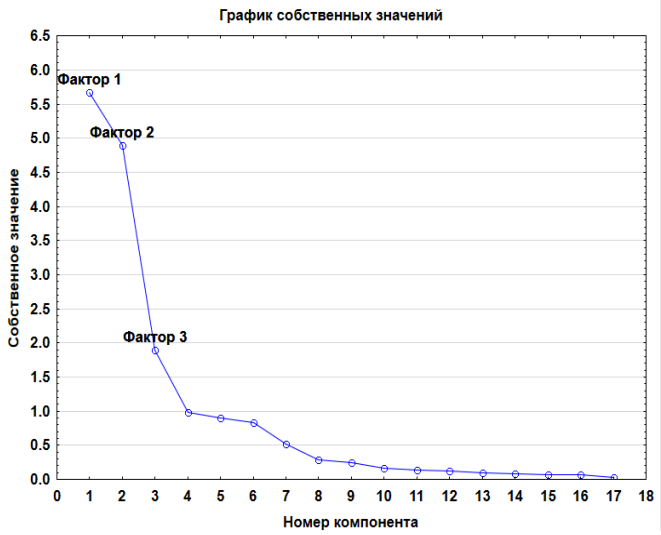


Рис. 1. График собственных чисел

Максимальное число общих факторов может быть равно количеству собственных чисел матрицы параметров. С увеличением их числа существенно возрастают трудности физической интерпретации. Анализ графика показывает, что в точках с координатами 1,2,3 убывание собственных значений слева направо замедляется наиболее существенно. Число факторов, удовлетворяющих критерию «каменистой осыпи» Р. Кеттелла, равно 3.

Для верификации выделения количества основных факторов выбран критерий Кайзера.

В табл. 2 представлены результаты факторного анализа. Для выделенных основных факторов величины собственных чисел $\lambda > 0$ и удовлетворяют критерию Кайзера (значимыми признаются факторы, собственное значение которых больше 1).

В данном случае 1-й фактор описывает более 33,36 % всей области значений переменных, в то время, как 3-й фактор дает представление 11,16 % области значений, что следует учитывать, поскольку в нашем случае это достаточно большой объем данных, так как выборка для каждой переменной содержит 41760 чисел измерений.

Кумулятивная дисперсия, которая отражает накопительный вклад каждого фактора, охватывает более 73,32 % данных.

Для определения переменных, оказывающих максимальное воздействие на каждый фактор и модель в целом, необходимо более подробно определить факторные нагрузки.

Факторные нагрузки – это значения коэффициентов корреляции каждого из исходных признаков с каждым из выявленных факторов. Для оптимизации поиска факторов проведено вращение факторной структуры по методу биквартимакс [1, 13].

В табл. 3 факторам соответствуют столбцы, а переменным – строки, для каждого фактора указывается нагрузка каждой исходной переменной.

Значение факторной нагрузки большее 0,7 показывает, что данная переменная тесно связана с рассматриваемым фактором. Положительный знак факторной нагрузки указывает на прямую связь данной переменной с фактором.

Наиболее выраженная прямая связь «Фактора 1» наблюдается с характеристиками по питательной воде, а именно с расходом питательной воды в трубопроводе за питательным насосом ТПН и перепадом давления воды на турбопитательном насосе ТПН. Коэффициенты корреляции соответственно составляют 0,928 и 0,909 (табл. 3).

Таблица 2. **Результаты факторного анализа**

№ фактора, п/п	Собственное число	Общая дисперсия, %	Кумулятивное собственное число	Кумулятивная дисперсия, %
1	5,67	33,36	5,67	33,36
2	4,90	28,80	10,56	62,16
3	1,90	11,16	12,46	73,32

Таблица 3. **Факторные нагрузки**

Наименование параметра	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Давление пара перед ГПЗ ТПН	0,854	0,045	–0,155
Давление пара перед стопорным клапаном ТПН	0,816	0,221	–0,137
Температура пара перед ГПЗ ТПН	0,908	–0,095	0,142
Расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами ТПН	0,242	0,864	0,352
Температура конденсата за эжекторами	0,090	0,256	0,888
Температура конденсата приводной турбины	–0,002	0,149	0,913
Давление пара за РК ТПН	0,893	–0,168	–0,043
Температура пара на выхлопе турбины ТПН	0,114	–0,943	–0,059
Уровень конденсата в конденсаторе ТПН	–0,072	–0,296	0,282
Давление паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН	0,184	–0,847	0,001
Температура паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН	0,007	–0,956	–0,071
Давление пара на эжекторы ТПН от РОУ и деаэраторов	0,225	–0,395	–0,452
Температура пара в коллекторе уплотнений	0,880	–0,007	0,148
Перепад давления цирк. воды до и после конденсатора ТПН	0,012	0,861	0,010
Разность температур охлаждающей воды до и после конденсатора ТПН	0,136	0,449	–0,147
Перепад давления питательной воды на насосе ТПН	0,909	–0,060	0,069
Расход питательной воды в трубопроводе за питательным насосом ТПН	0,928	0,055	–0,003
Общая дисперсия	5,668	4,636	2,161
Доля общей дисперсии	0,333	0,273	0,127

Следует отметить, что обе переменные являются характеристиками одного контура, а именно контура питательной воды насоса, и представляют собой основную целевую функцию – полезную мощность турбопитательного насоса.

Для «Фактора 2» наблюдается максимальная взаимосвязь с характеристиками по конденсату, такими как расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами ТПН и перепад давления циркуляционной воды до и после конденсатора ТПН. Коэффициенты корреляции в данном случае соответственно составляют 0,864 и 0,861 (табл. 3) и представляют прямую зависимость.

Наибольшее влияние на «Фактор 3» оказывают температура конденсата приводной турбины и температура конденсата за эжекторами. Коэффициенты корреляции соответственно составляют 0,913 и 0,888 и выражают прямую зависимость.

Таким образом, в результате проведенного факторного анализа определен ряд параметров, существенно влияющих на целевую функцию и эффективность эксплуатации турбопитательного насоса.

К ним относятся следующие параметры работы ТПН:

1) расход питательной воды в трубопроводе за турбопитательным насосом ТПН («Фактор 1»);

2) перепад давления воды на турбопитательном насосе ТПН («Фактор 1»);

3) расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами ТПН («Фактор 2»);

4) перепад давления циркуляционной воды до и после конденсатора ТПН («Фактор 2»);

5) температура конденсата приводной турбины («Фактор 3»).

С помощью метода главных компонент факторного анализа удалось выделить три основных фактора и определить параметры, влияющие на эффективность эксплуатации турбопитательного насоса.

Кластерный анализ. Кластерный анализ выполнен методами [1, 4, 9]:

- иерархической кластеризации;
- K-средних.

Метод иерархической кластеризации. Для классификации параметров построена иерархическая (древовидная) диаграмма (рис. 2), полученная при обработке экспериментальных данных.

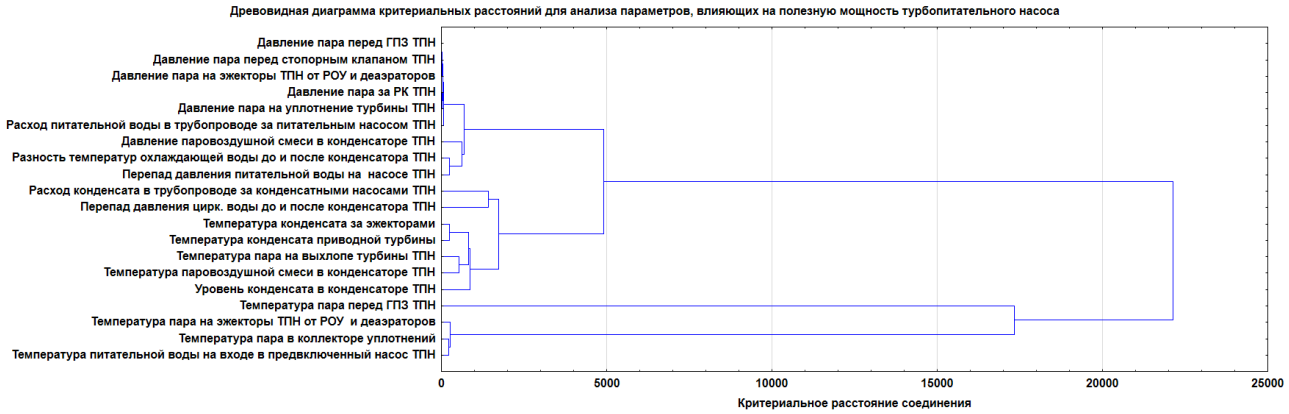


Рис. 2. Диаграмма для анализа параметров, влияющих на полезную мощность турбопитательного насоса и эффективность эксплуатации системы

На этой диаграмме ось абсцисс представляет расстояние объединения в кластеры. Каждому узлу на диаграмме соответствует величина расстояния, для которого соответствующие элементы связываются в новый единственный кластер. По оси ординат расположены параметры, оказывающие существенное влияние на работу ТПН. В результате кластеризации определены расстояния между объектами и кластерами при их последовательном объединении.

Анализируя диаграмму (рис. 2), целесообразно выделить пять крупных кластеров, в каждый из которых объединены наиболее связанные параметры. Введем обозначения: «Кластер 1», «Кластер 2», «Кластер 3», «Кластер 4» и «Кластер 5».

В «Кластер 1» объединены расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами ТПН и перепад давления циркуляционной воды до и после конденсатора ТПН.

В «Кластер 2» объединены температуры конденсата за эжекторами, конденсата приводной турбины, пара на выхлопе турбины ТПН, паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН и уровень конденсата в конденсаторе ТПН.

В «Кластер 3» объединены параметры:

- давление паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН;
- разность температур охлаждающей воды до и после конденсатора ТПН;
- перепад давления питательной воды на насосе ТПН.

В «Кластер 4» объединены наиболее связанные между собой параметры:

- давление пара перед ГПЗ ТПН;
- давление пара перед стопорным клапаном ТПН;
- давление пара за РК ТПН;
- давление пара на уплотнение турбины ТПН;
- давление пара на эжекторы ТПН от РОУ и деаэраторов;
- расход питательной воды в трубопроводе за питательным насосом ТПН.

В «Кластер 5» объединены температуры пара перед ГПЗ ТПН, пара на эжекторы ТПН от РОУ и деаэраторов, пара в коллекторе уплотнений, питательной воды на входе в предвключенный насос ТПН.

Выявлены внутренние зависимости основных параметров, входящих в кластеры. На перепад давления питательной воды на насосе ТПН оказывает воздействие давление паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН и разность температур охлаждающей воды до и после конденсатора ТПН. На расход питательной воды в трубопроводе за питательным насосом ТПН оказывает влияние давление пара системы собственных нужд энергоблока.

Параметры, входящие в «Кластер 3» и «Кластер 4», а именно расход питательной воды в трубопроводе за питательным насосом ТПН и перепад давления питательной воды на насосе ТПН, непосредственно влияют на полезную мощность турбопитательного насоса.

Метод K-средних. Задавалось число кластеров, полученное на основании предыдущего исследования – метода иерархической кластеризации.

Результаты проведенных расчетов сведены в табл. 4, где показаны детальный состав кластеров, количество кластеров и их классификация по принадлежности.

Таблица 4. **Состав кластеров**

Наименование параметра	№ кластера	Расстояние до центра кластера
Расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами ТПН	1	1,86
Перепад давления цирк. воды до и после конденсатора ТПН	1	1,86
Температура конденсата за эжекторами	2	2,34
Температура конденсата приводной турбины	2	2,99
Температура пара на выхлопе турбины ТПН	2	2,02
Уровень конденсата в конденсаторе ТПН	2	3,40
Температура паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН	2	4,37
Давление паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН	3	2,38
Разность температур охлаждающей воды до и после конденсатора ТПН	3	1,76
Перепад давления питательной воды на насосе ТПН	3	0,68
Давление пара перед ГПЗ ТПН	4	0,01
Давление пара перед стопорным клапаном ТПН	4	0,02
Давление пара за РК ТПН	4	0,23
Давление пара на уплотнение турбины ТПН	4	0,37
Давление пара на эжекторы ТПН от РОУ и деаэраторов	4	0,15
Расход питательной воды в трубопроводе за питательным насосом ТПН	4	0,48
Температура пара перед ГПЗ ТПН	5	64,57
Температура пара на эжекторы ТПН от РОУ и деаэраторов	5	22,65
Температура пара в коллекторе уплотнений	5	21,42
Температура питательной воды на входе в предвключенный насос ТПН	5	20,50

Расстояние до центра кластера обосновывает принадлежность элемента к конкретному кластеру.

Таким образом, при выполнении кластерного анализа методом K-средних получены точно такие же кластеры, как и при иерархической кластеризации.

Кластерный анализ позволил провести анализ внутренних закономерностей и зависимостей параметров работы ТПН.

Результаты анализа в дальнейшем позволят получить комплексы параметров, существенно влияющих на эффективность работы ТПН.

Выводы. Разработанная методика позволяет оценить влияние параметров на эффективность работы ТПН. В ходе работы с помощью метода факторного анализа определен перечень эксплуатационных параметров, существенно влияющих на критерии эффективности работы ТПН и целевую функцию (полезная мощность турбопитательного насоса).

Методами кластерного анализа (иерархической кластеризации и K-средних) выявлены внутренние взаимосвязи между эксплуатационными параметрами, влияющими на эффективность работы ТПН.

Расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами ТПН и перепад давления циркуляционной воды до и после конденсатора ТПН в соответствии с кластерным анализом объединены в «Кластер 1», что подтверждает максимальную взаимосвязь параметров с «Фактором 2» в факторном анализе.

Параметры, входящие в «Кластер 2», такие как температуры конденсата приводной турбины и конденсата за эжекторами, соответствуют параметрам «Фактора 3».

Параметры, объединенные в «Кластер 5», имеют значительные расстояния до центра кластера, что позволяет сделать вывод о том, что они оказывают косвенное влияние на работу ТПН.

Параметры, входящие в «Кластер 3» и «Кластер 4», практически совпадают с набором параметров, относящихся к «Фактору 1». Следует отметить, что расход питательной воды в трубопроводе за питательным насосом и перепад давления питательной воды на ТПН непосредственно влияют на его полезную мощность, поэтому в дальнейшем эти два кластера можно объединить.

На основе интерпретации полученных результатов можно сделать вывод о том, что количество факторов и кластеров совпадают.

Полученные на основе разработанной методики результаты являются достоверными, так как выявленные параметры соответствуют основным составляющим полезной мощности турбопитательного

насоса и критериям эффективности работы ТПН. Они могут применяться для построения статистической модели с использованием нейросетевых технологий.

Предложенная методика позволяет провести количественную и качественную оценку эксплуатационных параметров, решить задачу обработки больших массивов информации, снизить время и трудоемкость расчетов и может быть выбрана для оценки работы технологических систем и подсистем на ТЭС и АЭС.

Список литературы

1. **Электронный** учебник по статистике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.statsoft.ru

2. **Hartigan J.A.** Clustering algorithms. – N.Y.: John Wiley & Sons, 1975.

3. **Грунтович Н.В., Жеранов С.А.** Анализ электропотребления и оценка эффективности работы водозабора с применением аппарата кластерного анализа // Актуальные вопросы эксплуатации современных систем энергообеспечения и природопользования: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Брянск, 23–24 сентября 2015 года / под общ. ред. Л.М. Маркарянц. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2015. – С. 46–52.

4. **Будникова И.К., Приймак Е.В., Илларионова О.И.** Кластерный анализ в сегментировании рынка электрической энергии и мощности // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 7. – С. 275–278.

5. **Рыбалко В.В.** Параметрическое диагностирование энергетических объектов на основе факторного анализа в среде Statistica // Exponenta Pro. – 2004. – № 2(6). – С. 78–83.

6. **Методика** факторного анализа влияния характеристик энергетического оборудования (коэффициента мощности и коэффициента полезного действия) на энергосбережение и энергоэффективность / Д.Е. Давыдянц, В.Е. Жидков, В.С. Ядыкин и др. // Kant. – 2013. – № 2(8). – С. 51–57.

7. **Курбацкий В.Г., Томин Н.В.** Применение новых информационных технологий при решении электроэнергетических задач // Труды Братского государственного университета. Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – 2008. – Т. 2. – С. 26–32.

8. **Карамбиров С.Н., Мордясов М.А., Уманский П.М.** Анализ результатов расчетов переходных процессов в напорных трубопроводах методами кластерного анализа и нейронных сетей // Российская сельскохозяйственная наука. – 2016. – № 5. – С. 71–74.

9. **Горбунов В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок. – Иваново, 2011. – 475 с.

10. **Скоморохов А.О., Нахабов А.В., Белоусов П.А.** Автоматизированный анализ результатов радиографического контроля сварных соединений на АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 29–36.

11. **Ширшов Е.В., Иванченко А.А.** Применение кластерного анализа для оценки эффективности деятельности предприятия на основе использования нейросетевых технологий / Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. – Архангельск, 2020. – С. 119–124.

12. **Васильев В.А.** Определение КПД турбопитательной насосной установки термодинамическим способом // Вестник ЮУрГУ. – 2005. – № 1. – С. 162–167.

13. **Почекуев Е.Н., Путеев П.А.** Разработка классификации систем автоматизированного проектирования листовой штамповки на основе факторного и кластерного анализа // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 2-2(32-2). – С. 155–160.

References

1. *Elektronnyy uchebnik po statistike* [Electronic textbook on statistics]. Available at: http://www.statsoft.ru.

2. Hartigan, J.A. Clustering algorithms. N.Y.: John Wiley & Sons, 1975.

3. Gruntovich, N.V., Zheranov, S.A. Analiz elektropotrebleniya i otsenka effektivnosti raboty vodozabora s primeneniem apparata klasternogo analiza [Analysis of power consumption and evaluation of water intake efficiency using cluster analysis apparatus]. *Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy ekspluatatsii sovremennykh sistem energoobespecheniya i prirodopol'zovaniya»* [Proceedings of IX international scientific and technical conference “Topical issues of operation of modern systems of energy supply and environmental management”]. Bryansk, 2015, pp. 46–52.

4. Budnikova, I.K., Priymak, E.V., Illarionova, O.I. Klasternyy analiz v segmentirovanii rynka elektricheskoy energii i moshchnosti [Cluster analysis in segmentation of the electric energy and capacity market]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 7, pp. 275–278.

5. Rybalko, V.V. Parametricheskoe diagnostirovanie energeticheskikh ob"ektov na osnove faktornogo analiza v srede Statistica [Parametric diagnostics of energy objects based on factor analysis in the Statistica environment]. *Exponenta Pro*, 2004, no. 2(6), pp. 78–83.

6. Davydyants, D.E., Zhidkov, V.E., Yadykin, V.S. Metodika faktornogo analiza vliyaniya kharakteristik energeticheskogo oborudovaniya (koeffitsienta moshchnosti i koeffitsienta poleznogo deystviya) na energosberezhenie i energoeffektivnost' [Method of factor analysis of the influence of the characteristics of power equipment (power factor and efficiency coefficient) on energy saving and energy efficiency]. *Kant*, 2013, no. 2(8), pp. 51–57.

7. Kurbatskiy, V.G., Tomin, N.V. Primenenie novykh informatsionnykh tekhnologiy pri reshenii elektroenergeticheskikh zadach [Application of new information technologies in solving electric power problems]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri*, 2008, vol. 2, pp. 26–32.

8. Karambirov, S.N., Mordyasov, M.A., Umanskiy, P.M. Analiz rezul'tatov raschetov perekhodnykh protsessov v napornykh truboprovodakh metodami klasternogo analiza i neyronnykh setey [Analysis of the results of calculations of transients in pressure pipelines by methods of cluster analysis and neural networks]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*, 2016, no. 5, pp. 71–74.

9. Gorbunov, V.A. *Ispol'zovanie neyrosetevykh tekhnologiy dlya povysheniya energeticheskoy effektivnosti teplotekhnologicheskikh ustanovok* [The use of neural network technologies to increase the energy efficiency of thermal technology installations]. Ivanovo, 2011. 475 p.

10. Skomorokhov, A.O., Nakhabov, A.V., Belousov, P.A. Avtomatizirovannyy analiz rezul'tatov radiograficheskogo kontrolya svarnykh soedineniy na AES [Automated analysis of the results of radiographic inspection of welded joints at nuclear power plants]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2009, no. 3, pp. 29–36.

11. Shirshov, E.V., Ivanchenko, A.A. Primenenie klasternogo analiza dlya otsenki effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiya na osnove ispol'zovaniya neyrosetevykh tekhnologiy [Application of cluster analysis to assess the efficiency of an enterprise based on the use of neural network technologies]. *«Severnyy (Arkticheskiy) federal'nyy universitet imeni M.V. Lomonosova».* Arkhangel'sk, 2020, pp. 119–124.

12. Vasil'ev, V.A. Opredelenie KPD turbopitatel'noy nasosnoy ustanovki termodinamicheskim sposobom [Determination of the efficiency of a turbopump pumping unit by thermodynamic method]. *Vestnik YuUrGU*, 2005, no. 1, pp. 162–167.

13. Pochekuev, E.N., Puteev, P.A. Razrabotka klassifikatsii sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya listovoy shtampovki na osnove faktornogo i klasternogo analiza [Development of classification of computer-aided design systems for sheet stamping based on factor and cluster analysis]. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2(32-2), pp. 155–160.

УДК 621.311.22

Александр Яковлевич Шелгинский
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», доктор технических наук, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Россия, Москва, e-mail: ShelginskyAY@yandex.ru

Александр Геннадьевич Звончевский
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», магистрант кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Россия, Москва, e-mail: ZvonchevskyAG@mpei.ru

Энергосбережение в производстве аммофоса на основе эффективного использования тепловых ВЭР-технологий

Авторское резюме

Состояние вопроса. Потребность в росте производственных мощностей ключевых отраслей экономики России возникает на фоне последствий covid-режима и обосновывается кризисами социального, экономического и продовольственного характера. Гарантии продовольственной безопасности обеспечиваются за счет стабильности и развития национальных мощностей агропромышленного комплекса. В связи с этим на законодательном уровне разработана стратегия развития химических комплексов, а также сформирован план по развитию производств минеральной продукции в сфере агропромышленного комплекса, в рамках которого отмечается необходимость применения наилучших технологий при модернизации и возведении новых мощностей, обеспечивающих эффективное использование топливно-энергетических ресурсов, а также необходимость разработки научно-технических решений на базе энергосберегающих технологий. Комплекс глобальных проблем и существующих задач в сфере развивающегося агропромышленного комплекса определяют актуальность предложенного исследования, целью которого является разработка энергосберегающих мероприятий в производстве аммофоса.
Материалы и методы. В качестве объекта исследования выступает промышленный цех по изготовлению сложных минеральных удобрений (аммофоса). Анализируется технология производства, определяются источники нерационального использования энергии, а также исследуются тепловые процессы технологии на предмет оценки термодинамической эффективности. Для оценки эффективности разработанного мероприятия использованы методы термодинамического, экономического и экологического анализа.
Результаты. Предложены перспективные направления по совершенствованию технологических процессов, а также разработано энергосберегающее решение на основе утилизации побочной теплоты химических реакций. Разработана энергосберегающая когенерационная система, которая позволяет вырабатывать тепловую и электрическую энергию. Дана характеристика данного решения, а также рассмотрена возможность использования полученных видов энергии в производстве. На основе методов оценки эффективности, показана перспективность внедрения разработанного решения в производство, а также отмечена возможность масштабирования данного технологического решения на подобные промышленные объекты. Дана количественная оценка показателя экологической эффективности (снижение годового объема CO_2) при внедрении такой разработки в производство.
Выводы. Внедрение разработанного энергосберегающего мероприятия в дальнейшем позволит совершенствовать, модернизировать и возводить новые производства, которые будут иметь иные показатели эффективности как по энергетической, так и по экологической составляющей. Использование применяемых технологий в разработанном решении в подобных производствах может существенно улучшить показатели экономической эффективности не только конкретного объекта, но и всего агропромышленного комплекса.

Ключевые слова: энергосбережение, ВЭР-технологии, когенерация, экологическая эффективность

Alexander Yakovlevich Shelginsky
National Research University “MPEI”, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Industrial Thermal Power Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: ShelginskyAY@yandex.ru

© Шелгинский А.Я., Звончевский А.Г., 2022
Вестник ИГЭУ, 2022, вып. 4, с. 24–34.

Alexander Gennadievich Zvonchevsky
National Research University "MPEI", Master Degree Student of Industrial Thermal Power Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: ZvonchevskyAG@mpei.ru

Energy saving issues in production of ammophos based on effective use of thermal SER technologies

Abstract

Background. The need to increase the production facilities of the key sectors of the Russian economy arises as the consequences of the covid condition and is justified by social, economic and food crises. Guarantees of food security are provided due to stability and development of national facilities of the agro-industrial complex. Thus, on the legislative level a strategy to develop chemical networks has been developed. Also, a plan to develop mineral production in the agricultural sector has been made. The plan is to be carried out based on the best available technologies when redesign and install new facilities that ensure the efficient use of fuel and energy resources. In addition, it is necessary to work out scientific and technical solutions based on energy-saving technologies. All the global problems and the existing tasks in the field of mineral fertilizers production determine the importance of this study, the main purpose of which is to develop energy-saving measures in the production of ammophos.
Materials and methods. The subject of the study is an industrial workshop to produce compound fertilizer (ammophos). The production technology is analyzed, the sources of irrational utilization of energy are determined, and the thermal processes of the technology are studied to assess the thermodynamic efficiency. The methods of thermodynamic, economic, and environmental analysis are applied to assess the efficiency of the developed project.
Results. Promising trends to improve technological processes are proposed. Also, an energy saving solution based on the utilization of secondary heat of chemical reactions has been developed. An energy-saving cogeneration system has been developed that allows generating heat and electricity. The characteristic of this solution is given. The possibility to use the obtained types of energy in production is considered. The promising outlook to implement the developed solution into production is discussed based on the methods of assessment of performance. Also, the possibility to scale this technological solution to similar industrial facilities is considered. A quantitative assessment of the environmental performance indicator (reduction of the annual volume of CO_2) is given when introducing an energy-saving solution into manufacturing.
Conclusions. In the future introduction of the developed energy saving measures will make it possible to improve, modernize and build new production facilities that will have different performance indicators both in terms of energy and environmental components. The use of the applied technologies can significantly improve the economic efficiency indicators not only of a specific facility, but of the entire agro-industrial complex.

Key words: energy saving, SER technologies, cogeneration, ecological efficiency

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.024-034

Введение. На основе законодательной базы, согласно стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года[1], необходимо разрабатывать инновационные технологии в области энерго- и ресурсосбережения, выполнять плановые мероприятия по реконструкции и модернизации действующих производств, а также внедрять экономически эффективные и экологически безопасные мероприятия в химических производствах. В настоящее время в области химической промышленности в условиях постоянно возрастающей зависимости спроса на продукцию на законодательном уровне устанавливаются стратегические направления по развитию соответствующих секторов химической промышленности. Наряду с производственным развитием химической отрасли ставятся задачи по повышению энергетической и экологической эффективности. К наиболее значимым базовым отраслям химической промышленности относятся энергоемкие производства минеральных удобрений и различных неорганических веществ. Как правило, такие производства относятся к агропромышленному комплексу (АПК), поскольку получаемая продукция по большей части исполь-

[1] Стратегия развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года. Распоряжение от 18 мая 2016 года №954-р, Москва «Утвердить прилагаемый План мероприятий по реализации Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года». – М.: Правительство РФ, 2016. – 16 с.

зуется в сельскохозяйственной деятельности. АПК является ключевой отраслью для обеспечения продуктами питания жителей России. Ежегодно объем выпуска минеральных удобрений в среднем растет на 18 %, а к 2025 году прогнозируется повышение доли мирового потребления на 15–20 %. Согласно плану по развитию производства минеральных удобрений на период до 2025 года[2], необходимо совершенствовать технологические системы производств, искать новые способы сокращения потребления ТЭР, а также внедрять энергоэффективные решения на основе наилучших доступных технологий (НДТ). При выборе объекта исследования анализировались действующие технологии в сфере производства минеральной продукции для АПК [1], а также исследовалась научно-техническая база в сфере энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Материалы и методы. В настоящее время в России функционируют несколько основных технологий производства сложных минеральных удобрений (аммофоса). Наиболее распространенной и перспективной с точки зрения повышения единичной мощности является схема, функционирующая по схеме аммонизатор гранулятор – сушильный барабан (АГ-СБ). На основе технологического регламента действующего производства аммофоса производительностью 27,5 т/ч по готовому продукту [2] производится анализ энергоиспользования и показываются источники низкопотенциальной теплоты, энергия которых может быть использована в технологии и вспомогательных производствах. Принципиальная схема производства представлена на рис. 1.

Подготовленную фосфорную и серную кислоты совместно с газообразным аммиаком вводят в технологический реактор системы нейтрализации, где происходит смешение сырьевых продуктов или исходных реагентов и осуществляется нейтрализация кислот посредством протекающей экзотермической реакции. Далее полученный продукт реакции, или пульпа, направляется в АГ, где доаммонизируется жидким аммиаком и смешивается с ретуром, образуя продукт с иными минеральными показателями по химическому составу, или попросту – шихту, которая затем поступает в сушильный барабан (СБ). В СБ одновременно с сушкой осуществляется сортировка гранул аммофоса. Гранулы с несоответствующими диаметрами в виде ретура возвращаются в АГ. После стадии сушки аммофоса отработанный сушильный агент, парогазовая смесь (ПГС) и соковый пар поступают в систему абсорбции и затем выбрасываются в атмосферу.

Стоит отметить, что проблемы экологической безопасности в пропорциональной зависимости коррелируют с вопросами эффективного использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Так, при сжигании 1 тыс. $м^3$ природного газа в окружающую среду выбрасывается около 2 тонн CO_2 [3]. Экономия природного газа приводит также к существенному снижению выбросов вредных веществ в атмосферу.

В связи с вышеописанными направлениями по развитию химической промышленности и на основе существующих задач по повышению энергетической эффективности в области АПК, а также с учетом проблем экологического характера определена тема настоящего исследования, заключающаяся в разработке ресурсосберегающей и экологически безопасной модели технологической системы. Такая система позволяет реализовать энергетический потенциал производства, вследствие чего повысятся показатели его энергетической и экологической эффективности.

Для оценки энергопотребления предлагается проанализировать удельные показатели потребляемых энергоресурсов [4]. Так, например, при производстве одной тонны готовой продукции (аммофоса) с упаркой кислой пульпы по схеме аммонизатор гранулятор – сушильный барабан (АГ–СБ) затрачивается значительное количество ТЭР, значения которых представлены в табл. 1.

Необходимо отметить, что представленные данные об энергетических затратах (табл. 1) относятся к одному производству, где не учитываются нагрузки смежных производств по подготовке сырьевой продукции.

[2] План («дорожная карта») по развитию производства минеральных удобрений на период до 2025 года. Распоряжение от 29 марта 2018 г. № 532-р, Москва «Утвердить прилагаемый план мероприятий («дорожную карту») по развитию производства минеральных удобрений на период да 2025 года». – М.: Правительство РФ, 2018. – 18 с.

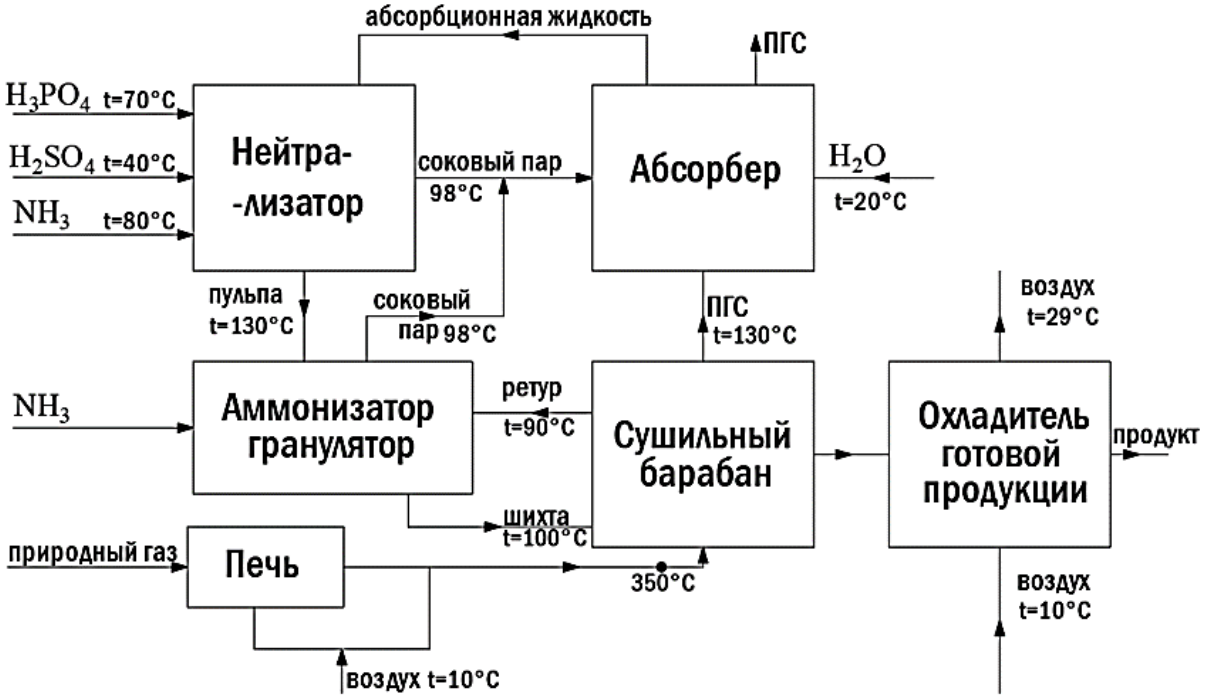


Рис. 1. Принципиальная схема производства аммофоса с АГ–СБ

Таблица 1. **Удельные энергетические затраты на получение готовой продукции**

Потребляемые топливно-энергетические ресурсы	Среднее значение
Электроэнергия, МДж/т	260
Природный газ, $м^3$/т	22
Тепловая энергия, Гкал/т	0,37

Анализируя удельные показатели энергетических затрат, можно отметить, что даже на одной технологической линии с часовой производительность до 30 т/ч по готовой продукции затрачивается значительное количество ТЭР. Для рассматриваемого производства аммофоса требуется часовой расход электроэнергии в количестве 7800 МДж, тепловой энергии в количестве 11,1 Гкал и природного газа в объеме 660 $м^3$.

Технология производства аммофоса по схеме АГ–СБ характеризуется низким показателем термодинамической эффективности, хотя и позволяет получать продукцию различных категорий высокого качества. Связано это с тем, что в технологической системе на различных этапах производства возникают огромные потери тепловой энергии. Значительная часть этой энергии теряется на этапе охлаждения в системе абсорбции. Большая часть теплоты, которую необходимо отводить, образуется в системе нейтрализации и аммонизации. Обусловливается это тем, что в элементах системы осуществляются экзотермические технологические процессы, в результате которых образуется побочная тепловая энергия. Как правило, теплота химических реакций таких процессов отводится в окружающую среду через градирню с потоком ПГС. На охлаждение или отвод теплоты подобного технологического процесса затрачивается энергия иных источников, вследствие чего возникают дополнительные энергетические потери. Связь технологических особенностей, проблем энергетической эффективности, а также вопросов экологической безопасности еще раз подтверждает важность развития энерго- и ресурсосберегающих технологий и значимость внедрения инновационных решений на базе НДТ, способствующих повышению энергетической и экологической эффективности [5].

Учитывая факторы стратегического развития химической отрасли, актуальность существующих задач в области энергосберегающих технологий, а также проблемы экологической безопасности, возможно вы-

делить наиболее целесообразные направления энерго- и ресурсосбережения в энерготехнологической системе производства сложных минеральных удобрений:

1) использование вторичных энергоресурсов производства (шламы, фосфогипс, пар);

2) модернизация отдельных аппаратов и систем технологического процесса;

3) совершенствование аппаратно-программного комплекса и систем автоматизации;

4) оптимизация технологических процессов и вспомогательных систем;

5) внедрение эффективных технологий газо- и пылеочистки.

Согласно тепловому балансу производства, в систему поступает тепловой поток 15278,6 кВт и в то же время 15047,8 кВт составляют потери, причем около 90 % этой теплоты теряется с потоками сокового пара и ПГС в системе абсорбции, которые затем отводятся в атмосферу. В табл. 2 представлены энергетические потоки тепловых ВЭР.

В качестве энергосберегающего оборудования предлагается использовать теплообменные аппараты, через которые теплота ВЭР передается внешним потребителям. Такое решение позволяет сократить энергетические потери и повысить коэффициент полезного использования (КПИ) тепловой энергии производства с 1,5 до 41 %.

Согласно представленным в табл. 2 данным, при охлаждении ПГС до температуры 71 ºС и при конденсации сокового пара суммарно располагаемый поток тепловых ВЭР составляет 11757 кВт. Теплоту ПГС после сушильного барабана было предложено использовать для подогрева наружного воздуха, который поступает в систему горелочных устройств печи для образования оптимального соотношения топливной смеси и в систему смешения топочных газов для понижения температуры сушильного агента в соответствии с регламентом технологического процесса, что существенно снижает потребление природного газа [6]. Тепловую энергию химических реакций с потоками сокового пара после систем нейтрализации и аммонизации предлагается использовать в когенерационной системе для совместной выработки электрической и тепловой энергии для компенсации основных нагрузок систем жизнеобеспечения цеха. Для определения потребности предприятия в требуемых нагрузках был произведен расчет энергопотребления цеха производства аммофоса производительностью 27,5 т/ч по готовому продукту.

Характеристика цеха производства и расчетные нагрузки. Производственный объект представляет собой цех с несколькими технологическими зонами, имеет наружную площадь 3420 м^2 с общей высотой здания 8 м. Для данного производства были определены основные нагрузки на системы жизнеобеспечения с учетом плановой модернизации некоторых технологических участков цеха. В соответствии с государственными стандартами, правилами и нормативно-технической документацией для соответствующих категорий энергоносителей был выполнен перерасчет нагрузок на системы отопления [7], вентиляции, кондиционирования (ОВК) [8], горячего водоснабжения (ГВС) и электроснабжения (ЭС) [9]. Результаты расчета представлены в табл. 3.

При использовании тепловой энергии сокового пара после систем нейтрализации и аммонизации при охлаждении паров и переохлаждении конденсата до температуры 45 ºС имеем возможность реализовать практически 5 МВт теплоты. Для обеспечения внешних потребителей тепловой и электрической энергией на основе тепловых ВЭР-технологий предлагается блочно-модульная когенерационная установка (БМКУ), которая позволит частично покрывать основные нагрузки цеха по тепловой и электрической энергии. Предлагаемое технологическое решение по модернизации исходной схемы производства представлено на рис. 2.

Таблица 2. **Выход тепловых ВЭР**

Поток	Выходные параметры		
	расход *G*, кг/ч	температура *t*, °С	тепловой поток *Q*, кВт
Соковый пар после систем нейтрализации	3564	98	2179
Соковый пар после системы аммонизации	3600	98	2201
ПГС после сушильного барабана	123980	130	7377

Таблица 3. **Нагрузки основных систем жизнеобеспечения производства**

Нагрузка		Значение
Система отопления Q_o^P, кВт		173,01
Система вентиляции $Q_в^P$, кВт		1216,03
Система горячего водоснабжения $Q_{гвс}^P$, кВт		34,61
Система холодоснабжения Q_x^P, кВт		496,81
Система электроснабжения	осветительная часть (cosφ = 0,96) $P_{осв}^P$, кВт	150,00
	силовая часть (cosφ = 0,75) $P_{сил}^P$, кВт	2166,60

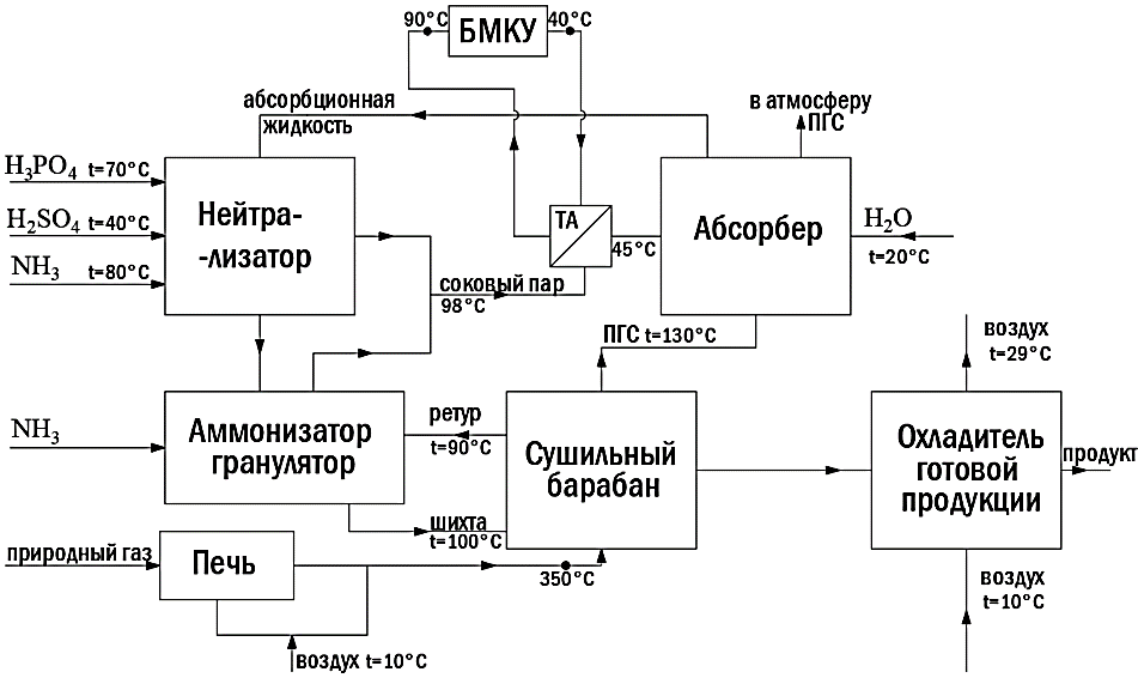


Рис. 2. Модернизированная схема производства аммофоса

Описание новой схемы. Кислотные пары, образовавшиеся в процессе нейтрализации и аммонизации, ранее направлялись в систему абсорбции, где значительная часть вредных веществ абсорбировалась, затем тепловой поток с ПГС отводился в окружающую среду. В модернизированной схеме теплота сокового пара от нейтрализатора и АГ используется в системе БМКУ для совместной выработки тепловой и электрической энергии, которая частично или полностью может быть использована в энергетических системах обеспечения жизнедеятельности (ЭСОЖ), например в системах ГВС, отопления, вентиляции и электроснабжения. За счет использования теплоты химических реакций нейтрализатора и АГ появится возможность самостоятельно и автономно покрывать мощности соответствующих нагрузок ЭСОЖ, что поспособствует сокращению потребляемых ТЭР (природного газа) на выработку соответствующих видов энергии. Кроме того, за счет понижения температуры в абсорбере вследствие снижения тепловой нагрузки на всю систему улучшится процесс интенсификации абсорбции в орошаемую воду. Это позволит снизить концентрацию вредных химических соединений в отводимой ПГС в атмосферу, что благоприятно отобразится на экологической обстановке в регионе.

Описание БМКУ. БМКУ представляет собой комбинированную систему, основным и вспомогательным продуктом которой является соответственно электрическая и тепловая энергия. Источником тепловой энергии контура детандер-генераторной установки (ДГУ), как и остальных систем БМКУ, является общий поток сокового пара после систем нейтрализации и аммонизации с параметрами t_1/t_2 = 98/45 ºС, который нагревает внутреннюю теплосетевую воду. Параметры внутренних контуров БМКУ системы вентиляции и системы отопления в расчетном режиме при рабочих давлениях,

не превышающих 0,5 МПа по всей сети, составляют соответственно $t_{в1}/t_{в2}$ = 61/48 ºС и $t_{о1}/t_{о2}$ = 60/50 ºС. Система горячего водоснабжения в отопительный и летний периоды, согласно расчетам, должна обеспечивать потребителя водой с температурой не менее 60 ºС. Режим отпуска тепловых нагрузок на системы вентиляции и отопления методически осуществляется качественно-количественным регулированием с применением дополнительной автоматизированной системы на основе регулирования в зависимости от температуры наружного воздуха. Схема присоединения цеха к тепловой сети БМКУ – зависимая.

Выработка электроэнергии осуществляется в контуре ДГУ, работающей на основе органического цикла Ренкина (ОЦР) [10]. Максимальное значение вырабатываемой электрической мощности в ДГУ достигается при температуре конденсации рабочего тела $t_к$ = 10 ºС и составляет 1439268 кВт·ч/год. В качестве охлаждающей установки конденсатора предлагается использовать абсорбционную бромистолитьевую холодильную машину (АБХМ). Общая нагрузка на БМКУ при номинальной тепловой мощности ВЭР составляет 4947,6 кВт. Разработанная принципиальная схема БМКУ представлена на рис. 3.

Описание работы БМКУ. Образовавшиеся в процессе химических реакций нейтрализации соковые пары поступают в теплообменный аппарат (ТА), где отдают часть тепловой энергии промежуточному контуру теплосетевой воды, которая имеет температурный график $t_{С1}/t_{С2}$ = 90/40 ºС. БМКУ состоит из 4 основных и 1 вспомогательного контура: ГВС, системы отопления, системы вентиляции, ДГУ и охлаждающей установки, соединяющей через промежуточный теплоноситель испаритель АБХМ и конденсатор ДГУ (рис. 3). Тепловая энергия сетевой воды распределяется оптимально между системами когенерационной установки, а тепловые потоки систем отопления и вентиляции регулируются в зависимости от температуры наружного воздуха. Неиспользованная теплота в неотопительный период отводится через градирню *16*. ДГУ, работающая на ОЦР, состоит из испарительного и конденсаторного блоков, детандера, электрогенератора и циркуляционного насоса. В качестве низкокипящего рабочего тела в контуре используется фреон R600a (изобутан).

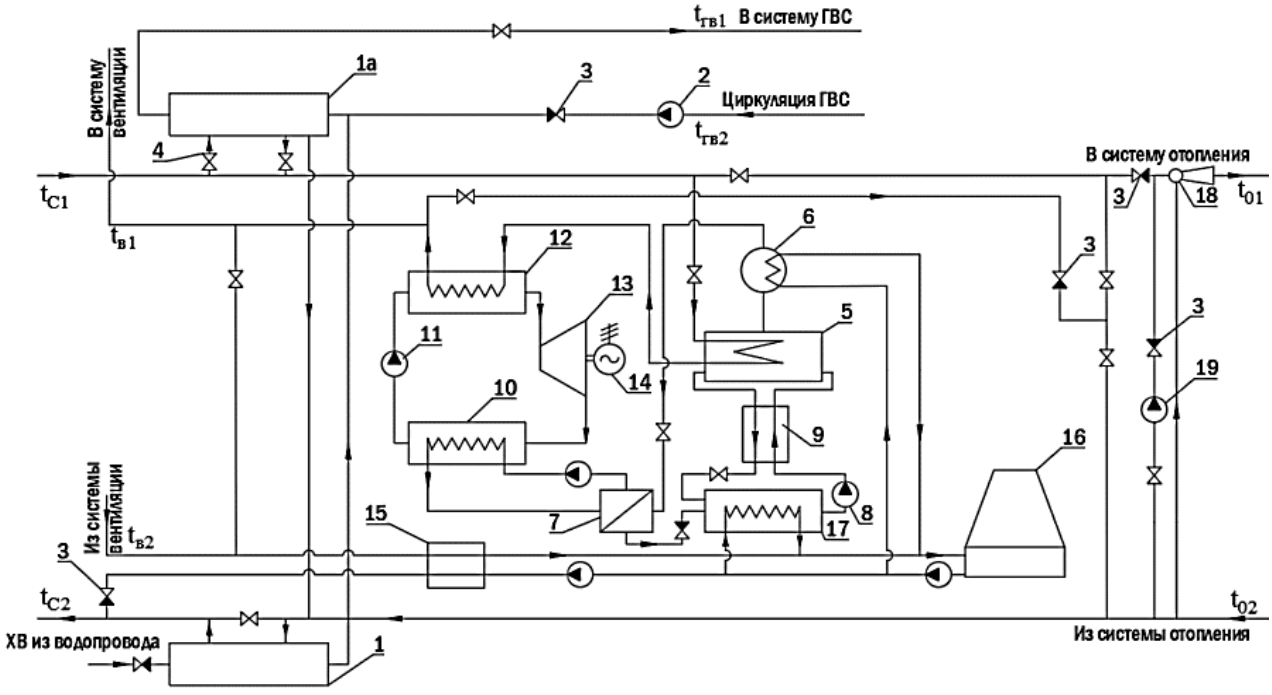


Рис. 3. Принципиальная схема БМКУ: 1 – подогреватель ГВС I; 1а – подогреватель ГВС II; 2 – циркуляционный насос ГВС; 3 – обратный клапан; 4 – задвижка/вентиль; 5 – генератор АБХМ; 6 – конденсатор; 7 – испаритель АБХМ; 8 – насос крепкого раствора; 9 – регенеративный теплообменник растворов; 10 – конденсатор ОЦР; 11 – циркуляционный насос; 12 – испаритель ОЦР; 13 – детандер; 14 – электрогенератор; 15 – вспомогательный теплообменный блок; 16 – градирня; 17 – абсорбер АБХМ; 18 – элеватор системы отопления; 19 – вспомогательный рециркуляционный насос системы отопления

В отопительный период часть тепловой энергии отбирается в подогревателе ГВС второй ступени *1а*, другая часть поступает в систему отопления цеха с помощью элеватора *18* и большая часть поступает последовательно через генератор АБХМ *5* и испаритель контура ДГУ *12* в теплообменник системы вентиляции. В расчетном режиме нагрузка на систему отопления составляет 173 кВт, на систему вентиляции – 1216 кВт, на горячее водоснабжение – 34,5 кВт, на контур ДГУ и охлаждающей установки отводится 2780 кВт. Нагреваемый низкокипящий теплоноситель в контуре ОЦР испаряется, образуя паровую фазу в области перегретого пара. Затем образовавшийся пар расширяется в детандере *13*, совершая работу, которая посредством электрогенератора *14* преобразуется в электроэнергию. В конденсаторе *10* пары рабочего тела охлаждаются и затем конденсируются за счет отвода теплоты через ОУ. Циркуляционный насос *11* нагнетает рабочее тело, обеспечивая циркуляцию в контуре. При высоком давлении рабочее тело поступает в парогенератор *12* и цикл на этом замыкается. Отвод теплоты конденсатора *10* в количестве 1120 кВт осуществляется за счет промежуточного контура ОУ. В генераторе АБХМ *5* нагревается легкокипящий компонент, после чего его пары поступают в конденсатор *6*, конденсируются, затем дросселируются и направляются в испаритель *7*, испаряясь – вырабатывают холод для отвода теплоты конденсатора контура ОЦР. Образовавшиеся в испарителе АБХМ пары направляются в абсорбер *17*, где происходит абсорбция крепким раствором соли паров хладагента. Далее, после образования слабого раствора, посредством насоса *8* раствор перекачивается через регенеративный ТА растворов *9* в генератор, и на этом цикл холодильной машины замыкается. Теплота конденсатора *6* и абсорбера *17* АБХМ в количестве 2562 кВт отводится в градирне *16*, которая рассчитана на суммарную нагрузку 5830 кВт с учетом переменных режимов по сезонам.

Для обеспечения требуемой температуры воды в обратном трубопроводе БМКУ теплосетевая вода после калорифера системы вентиляции через вспомогательный блок ТА *15* направляется для охлаждения в общую градирню *16*, затем охлажденный поток подогревается в блоке ТА и далее подмешивается в обратный трубопровод. При этом регулирование тепловой мощности вспомогательного блока ТА осуществляется с помощью автоматизированной системы в переменном режиме с нагрузками в диапазоне от 239 до 1241 кВт в зависимости от сезона.

Для поддержания необходимых технологических параметров в системе производства аммофоса в ТА (соковый пар – вода) (см. рис. 2) поддерживаются постоянными тепловой поток и перепады температур.

Результаты. Таким образом, разработанная когенерационная система позволяет полностью обеспечить производство требуемыми тепловыми нагрузками на системы ЭСОЖ, а также за счет вырабатываемой электроэнергии возможно покрыть часть электрической нагрузки системы электроснабжения. Так, за счет использования теплоты химических реакций технологических установок возможно покрыть тепловые нагрузки цеха на ГВС, отопление и вентиляцию с обеспеченностью 98–100 %. Также с учетом потребляемой электроэнергии на обеспечение работы самой БМКУ возможно покрыть 95–99 % осветительной нагрузки цеха либо часть силовой сети с активной нагрузкой до 7 %. При этом за счет сокращения тепловых потерь с соковым паром в количестве 4947,6 кВт повысится коэффициент полезного использования тепловой энергии в производстве аммофоса на 32,4 % [11]. Реализация теплоты химических реакций в технологической системе БМКУ при стоимости тепловой энергии 1000 руб. за 1 Гкал теплоты для данной категории промышленного объекта позволит экономить 13,7 млн руб/год. За счет выработки электрической энергии в контуре ДГУ при стоимости 5 руб/кВт·ч возможно сэкономить 7,2 млн руб/год. Таким образом, когенерационная система на основе использования тепловых ВЭР-технологий способна обеспечивать внешних потребителей тепловой и электрической энергией, для получения которой потребовалось бы сжигать около 5,03 млн м^3 природного газа в год. Экономия ТЭР в условном топливе составит около 4 тыс. т у. т/год. Кроме того, внедрение разработанной технологической системы в производство аммофоса способствует сокращению выбросов CO_2 на 9,2 тыс. тонн в год.

Обсуждение. На примере одного производства показано, что объекты с от-

носительно небольшими производственными мощностями содержат значительный потенциал энергосбережения. За счет использования побочной энергии химических реакций, возникающей в технологическом процессе производства, в системах, реализующих современные научно-технические технологии, возможно генерировать различные виды энергии самостоятельно, что дает возможности к существенной экономии ТЭР за счет самостоятельного покрытия основных нагрузок в энергетических системах обеспечения жизнедеятельности предприятия.

Перспективность когенерационных систем сложно переоценить, особенно когда подобные технологии реализуются совместно с технологиями, позволяющими получать полезную энергию за счет утилизации тепловых ВЭР производства. Внедрение вышеописанных технологий в энергоемких производствах АПК существенно повышает КПИ производства, а за счет комбинированной выработки тепловой и электрической энергии возможно значительно снизить потребление ТЭР, что в целом приводит к росту показателей энергетической эффективности. Экономия природного газа способствует снижению углеродного следа, вследствие чего повышаются показатели экологической безопасности и таким образом достигаются цели углеродной нейтральности [12].

Стоит отметить, что разработанная модель когенерационной системы может быть реализована в подобных энергетических объектах химической отрасли, которые имеют значительный энергетический потенциал. Кроме того, в зависимости от технологических особенностей конкретного производства, могут быть реализованы отдельные технологии, использованные в когенерационной системе. Также при разработке и моделировании такого типа систем необходимо детально исследовать потенциальные источники ВЭР конкретного производства на предмет технологической совместимости с разрабатываемыми системами. На основе целевых термодинамических параметров соответствующих энергетических потоков, а также в соответствии с классификационной категорией энергоносителя при разработке электрогенерирующей установки, функционирующей по технологии ОЦР, для корректного подбора наиболее эффективного низкокипящего рабочего тела необходимо учитывать ряд технологических особенностей [13].

Выводы. Предложенное направление, позволяющее реализовать теплоту химических реакций систем нейтрализации и аммонизации в целях ее эффективного использования в производстве, является целесообразным.

Представленная модернизированная схема производства аммофоса и разработанная модель когенерационной установки БМКУ позволяют покрыть значительную долю энергетических нагрузок цеха по тепловой и электрической энергии за счет утилизации теплоты химических реакций.

На основе методов энергетического, экономического и экологического анализа делается вывод о перспективности внедрения разработанной БМКУ в технологию производства аммофоса.

Отмечается возможность использования полученных результатов в подобных энергетических объектах АПК.

Список литературы

1. **Лапушкин В.М., Аксенчик К.В., Малявин А.С.** Производство минеральных удобрений // Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий. – М.; СПб.: Центр экологической промышленной политики, 2019. – С. 515–561.

2. **Шелгинский А.Я.** Разработка энергосберегающих и экологически прогрессивных направлений производства минеральных удобрений на основе высокоэффективных тепловых схем и интенсификации тепломассообмена: дис. … д-ра техн. наук. – М., 1997. – 278 с.

3. **Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гатина Р.З.** Возможные пути снижения выбросов углекислого газа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 9–10. – С. 21–31. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-21-31

4. **Федеральное** агентство по техническому регулированию и метрологии. ИТС 2-2019. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. – 2-е изд. – М.: Бюро НДТ, 2019. – 818 с.

5. **Козел Д.А., Остапович Л.М.** Экологическая эффективность // Культура и экология – основы устойчивого развития России. Человеческий капитал как ключевой ресурс зеленой экономики: материалы междунар. форума, Екатеринбург, 13–16 апреля 2018 г. – Екатерин-

бург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – С. 236–240.

6. **Звончевский А.Г., Шелгинский А.Я.** Анализ эффективности использования теплоты запыленных газов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп., Москва, 17–19 марта 2022 г. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг Радуга», 2022. – С. 538.

7. **Шелгинский А.Я.** Системы отопления жилых, общественных, производственных зданий: учеб. пособие. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 116 с.

8. **Вентиляция** воздуха в производственных, общественных, жилых зданиях: учеб. пособие / А.Я. Шелгинский, М.Н. Степаненко, А.С. Маленков, Ю.В. Яворовский. – М.: Изд-во МЭИ, 2017. – 116 с.

9. **Бекиров Э.А.** Электроснабжение промышленных предприятий, зданий, сооружений с использованием энергоагрегатов возобновляемой энергетики. – Симферополь: ООО Изд-во «Типография “Ариал”», 2019. – 372 с.

10. **Белов Г.В., Дорохова М.А.** Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 2. – С. 99–124.

11. **Трубаев П.А., Беседин П.В., Зайцев Е.А.** Термодинамический и эксергетический анализ теплотехнологических систем: учеб. пособие. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 104 с.

12. **Шумилов А.В., Самородова Л.Л.** Углеродная нейтральность и возможные способы ее достижения // Россия молодая: сб. материалов XIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 г. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 840151–840156.

13. **Обзор** результатов и методов комплексного исследования рабочих веществ фторорганического состава энергетических установок / М.С. Моркин, В.В. Лемехов, Ю.С. Черепнин и др. // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – № 2(10). – С. 140–147.

References

1. Lapushkin, V.M., Aksenchik, K.V., Malyavin, A.S. Proizvodstvo mineral'nykh udobreniy [Production of mineral fertilizers]. *Entsiklopediya tekhnologiy. Evolyutsiya i sravnitel'nyy analiz resursnoy effektivnosti promyshlennykh tekhnologiy* [Encyclopedia of Technologies. Evolution and comparative analysis of the resource efficiency of industrial technologies]. Moscow; Saint-Petersburg: Tsentr ekologicheskoy promyshlennoy politiki, 2019, pp. 515–561.

2. Shelginskiy, A.Ya. *Razrabotka energosberegayushchikh i ekologicheski progressivnykh napravleniy proizvodstva mineral'nykh udobreniy na osnove vysokoeffektivnykh teplovykh skhem i intensifikatsii teplomassoobmena.* Diss. … d-ra tekhn. nauk [Development of energy-saving and environmentally progressive directions of production of mineral fertilizers based on highly efficient thermal schemes and intensification of heat and mass exchange. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 1997. 278 p.

3. Gafurov, A.M., Osipov, B.M., Gatina, R.Z. Vozmozhnye puti snizheniya vybrosov uglekislogo gaza [Possible ways to reduce carbon dioxide emissions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2017, vol. 19, no. 9–10, pp. 21–31. Available at: https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-21-31

4. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. ITS 2-2019. Production of ammonia, mineral fertilizers and inorganic acids. – Moscow: Byuro NDT, 2019. – 818 p.

5. Kozel, D.A., Ostapovich, L.M. Ekologicheskaya effektivnost' [Ecological efficiency]. *Materialy mezhdunarodnogo foruma «Kul'tura i ekologiya – osnovy ustoychivogo razvitiya Rossii. Chelovecheskiy kapital kak klyuchevoy resurs zelenoy ekonomiki», Ekaterinburg, 13–16 aprelya 2018 g.* [Proceedings of the international forum “Culture and ecology – fundamentals of sustainable development of Russia. Human capital as a key resource of the green Economy”, Ekaterinburg, April 13–16, 2018]. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2018, pp. 236–240.

6. Zvonchevskiy, A.G., Shelginskiy, A.Ya. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya teploty zapylennykh gazov [An analysis of the efficiency of using the heat of dusty gases]. *Tezisy dokladov XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika», Moskva, 17–19 marta 2022 g.* [Abstracts of XXVIII International Scientific and Technical Conference of students and postgraduates “Radioelectronics, electrical engineering and power engineering”, March 17–19, 2022, Moscow]. Moscow: LLC «Center for Graphic services Rainbow», 2022, p. 538.

7. Shelginskiy, A.Ya. *Sistemy otopleniya zhilykh, obshchestvennykh, proizvodstvennykh zdaniy* [Heating systems of residential, public, in-

dustrial buildings]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2012. 116 p.

8. Shelginskiy, A.Ya., Stepanenko, M.N., Malenkov, A.S., Yavorovskiy, Yu.V. *Ventilyatsiya vozdukha v proizvodstvennykh, obshchestvennykh, zhilykh zdaniyakh* [Air ventilation in industrial, public, residential buildings]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2017. 116 p.

9. Bekirov, E.A. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy, zdaniy sooruzheniy s ispol'zovaniem energoagregatov vozobnovlyaemoy energetiki* [Power supply of industrial enterprises, buildings and structures using renewable energy units]. Simferopol': OOO Izdatel'stvo «Tipografiya “Arial”», 2019. 372 p.

10. Belov, G.V., Dorokhova, M.A. Organicheskiy tsikl Renkina i ego primenenie v al'ternativnoy energetike [Rankin's organic cycle and its application in alternative energy]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2014, no. 2, pp. 99–124.

11. Trubaev, P.A., Besedin, P.V., Zaytsev, E.A. *Termodinamicheskiy i eksergeticheskiy analiz teplotekhnologicheskikh sistem* [Thermodynamic and kinetic analysis of thermal technology systems]. Belgorod: Izdatel'stvo BGTU im. V.G. Shukhova, 2009. 104 p.

12. Shumilov, A.V., Samorodova, L.L. Uglerodnaya neytral'nost' i vozmozhnye sposoby ee dostizheniya [Carbon neutrality and possible ways to achieve it]. *Sbornik materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya», Kemerovo, 20–23 aprelya 2021 g.* [Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation “Young Russia”, Kemerovo, April 20–23, 2021]. Kemerovo: Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2021, pp. 840151–840156.

13. Morkin, M.S., Lemekhov, V.V., Cherepnin, Yu.S. Obzor rezul'tatov i metodov kompleksnogo issledovaniya rabochikh veshchestv ftororganicheskogo sostava energeticheskikh ustanovok [Review of the results and methods of a comprehensive study of the working substances of the organofluorine composition of power plants]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2017, no. 2(10), pp. 140–147.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.317.3/УДК 621.314.2

Алексей Васильевич Манин
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и промышленной электроники, Россия, Рыбинск,
e-mail: manin-rgata@mail.ru; root@rgata.ru

Дмитрий Борисович Вайнер
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева, аспирант, Россия, Рыбинск, e-mail: dimavdb@yandex.ru

Система мониторинга параметров распределительной сети с корректирующим управлением на основе нейронной сети

Авторское резюме

Состояние вопроса. Управление компенсирующими устройствами осуществляется, как правило, в структуре системы автоматического регулирования с датчиками параметров сети и системой управления, включенными в конкретный узел электрической сети. Однако при этом общее состояние электрической сети по перетокам реактивной мощности не учитывается. В настоящее время наибольшее распространение получили быстродействующие статические компенсаторы реактивной мощности, построенные по принципу косвенной системы компенсации, обладающей рядом недостатков. В связи с этим в целях оптимизации перетоков реактивной мощности и поддержания заданных значений напряжений в узлах сети при резкопеременном характере потребления реактивной мощности необходимо стабилизировать требуемые параметры сети и минимизировать потери электрической энергии от протекания реактивной мощности.
Материалы и методы. В целях повышения энергоэффективности корректирующих устройств в структуре мониторинга предлагается применять статические компенсаторы реактивной мощности на базе магнитовентильных элементов. В целях формирования управляющих воздействий для прогнозирования мощностей потребителей в структуру мониторинга вводится модуль искусственной нейронной сети, обученной на основе модели электросети, описанной методом объединенных матриц и позволяющей вводить поправки на формирование управляющих сигналов на корректирующие устройства главным процессором.
Результаты. Предлагается формировать управляющие сигналы на корректирующие устройства посредством обработки информации, полученной с удаленных датчиков напряжения и тока распределительной сети. Предложена структура мониторинга распределительной сети, позволяющая стабилизировать требуемые параметры сети у потребителей, минимизировать потери электрической энергии от протекания реактивной мощности.
Выводы. Блок нейронных сетей позволяет минимизировать развитие экстремальных и аварийных ситуаций. Применение варианта статических компенсаторов реактивной мощности на базе магнито-

© Манин А.В., Вайнер Д.Б., 2022
Вестник ИГЭУ, 2022, вып. 4, с. 35–45.

вентильных элементов дополнительно повышает энергоэффективность системы мониторинга распределительной сети. Применение в системе мониторинга распределительной сети матричного анализа параметров сети для формирования управляющих сигналов на корректирующие устройства позволяет оптимизировать сети и минимизировать потери на реактивную мощность в целях выбора и установки устройств компенсации реактивной мощности и управления ими. Использование в качестве корректирующего устройства СКРМ на базе магнитовентильных элементов дополнительно повышает эффективность компенсации реактивной мощности в сетях с резкопеременными потребителями.

Ключевые слова: мониторинг, локальная вычислительная сеть, матрицы контурных ЭДС, матрицы контурных сопротивлений и контурных токов, матрица мощностей, статический компенсатор реактивной мощности, искусственная нейронная сеть

Aleksey Vasilyevich Manin
Rybinsk State Aviation Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Engineering and Industrial Electronics Department, Russia, Rybinsk, e-mail: manin-rgata@mail.ru; root@rgata.ru

Dmitriy Borisovich Vyner
Rybinsk State Aviation Technical University, Postgraduate Student, Russia, Rybinsk, e-mail: dimavdb@yandex.ru

System of monitoring parameters of distribution grid with corrective control based on neural network

Abstract

Background. As a rule, the control of compensating devices is carried out in the automatic control system with sensors of network parameters and control system included in a specific node of the electrical network. However, the general state of the electrical network in terms of reactive power flows is not considered. At present, static VAR compensators are mostly spread. They are designed on the principle of an indirect compensation system, which has several disadvantages. In this regard, to optimize reactive power flows and maintain the specified voltage values in the network nodes with an abruptly variable nature of reactive power consumption, it is necessary to stabilize the required network parameters and minimize the loss of electrical energy due to the flow of reactive power.
Materials and methods. To improve the energy efficiency of corrective devices, it is proposed to use static VAR compensators based on magnetic valve elements. To generate control actions, an artificial neural network (ANN) module is introduced into the monitoring to predict the capacities of consumers. Such a neural network is based on an electrical network model described by the combined matrix method. The main processor generates control signals for corrective devices.
Results. The authors have proposed to generate control signals for corrective devices by processing information received from remote voltage sensors and current sensors of the distribution grid. The proposed system for monitoring the distribution grid makes it possible to stabilize the required parameters of the network for consumers, to minimize the loss of electrical energy due to the flow of reactive power.
Conclusions. The block of neural networks minimizes the emergency situations and accidents. The use of the static VAR compensators based on magnetic valve elements will additionally improve the energy efficiency of the distribution network monitoring system. The use of matrix analysis of network parameters in the distribution network of monitoring system to generate control signals for corrective devices allows optimizing networks in such a way as to minimize reactive power losses to select and install reactive power compensation devices and control them. The use of SVC based on magnetic valve elements as a corrective device improves the efficiency of reactive power compensation in networks with an abruptly variable nature of electrical energy consumption.

Key words: monitoring, Local Area Network, matrix of contour EMF, matrix of contour resistance and contour current, matrix of power, static Var compensator, artificial neural network

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.035-045

Введение. В настоящее время ведущие научно-исследовательские организации ведут работу, связанную с проектированием электрических сетей с ориентацией на новую концепцию Smart Grid [1]. В основе Smart Grid лежат активные элементы, обеспечивающие корректировку параметров электрической сети в целях поддержания требуемых энергетических показателей. В частности, подобными устройствами

являются компенсаторы реактивной мощности или другие корректирующие устройства различного схемотехнического решения, например статические компенсаторы реактивной мощности (СКРМ) с возможностью быстродействующего изменения реактивной мощности.

Как правило, управление СКРМ осуществляется посредством автономной системы управления, которая не способна учитывать состояние более удаленных узлов распределенной сети. Более корректное влияние на сеть в целях поддержания требуемых параметров напряжения или коэффициента мощности может быть обеспечено включением СКРМ в конкретный расчетный узел сети, а управление им должно осуществляться управляющим сигналом, оценивающим состояние контролируемой сети. Для этого в мониторинг по состоянию сети включается система управления СКРМ, в результате чего формируется скорректированное управляющее воздействие на блок управления СКРМ и результирующее воздействие на параметры сети будет более оптимальным.

Структурная схема мониторинга сети с силовыми корректирующими устройствами, включающая локальную вычислительную сеть, представлена на рис. 1.

Методы исследования. Работа системы мониторинга осуществляется по следующему алгоритму: с датчиков сети, размещенных в выбранных узлах, информация поступает в блок мониторинга; с блока мониторинга данные поступают в контроллер и сравниваются со значениями соответствующих параметров, установленными оператором; при существенном отклонении текущих параметров сети от нормативных формируются управляющие воздействия на корректирующие исполнительные устройства. В качестве корректирующих устройств помимо быстродействующих компенсаторов реактивной мощности и управляемых конденсаторных батарей могут быть применены симметрирующие устройства, активные фильтры и коммутаторы сети. В этом случае система будет работать в обычном режиме многоуровневой системы автоматического регулирования [2, 3].

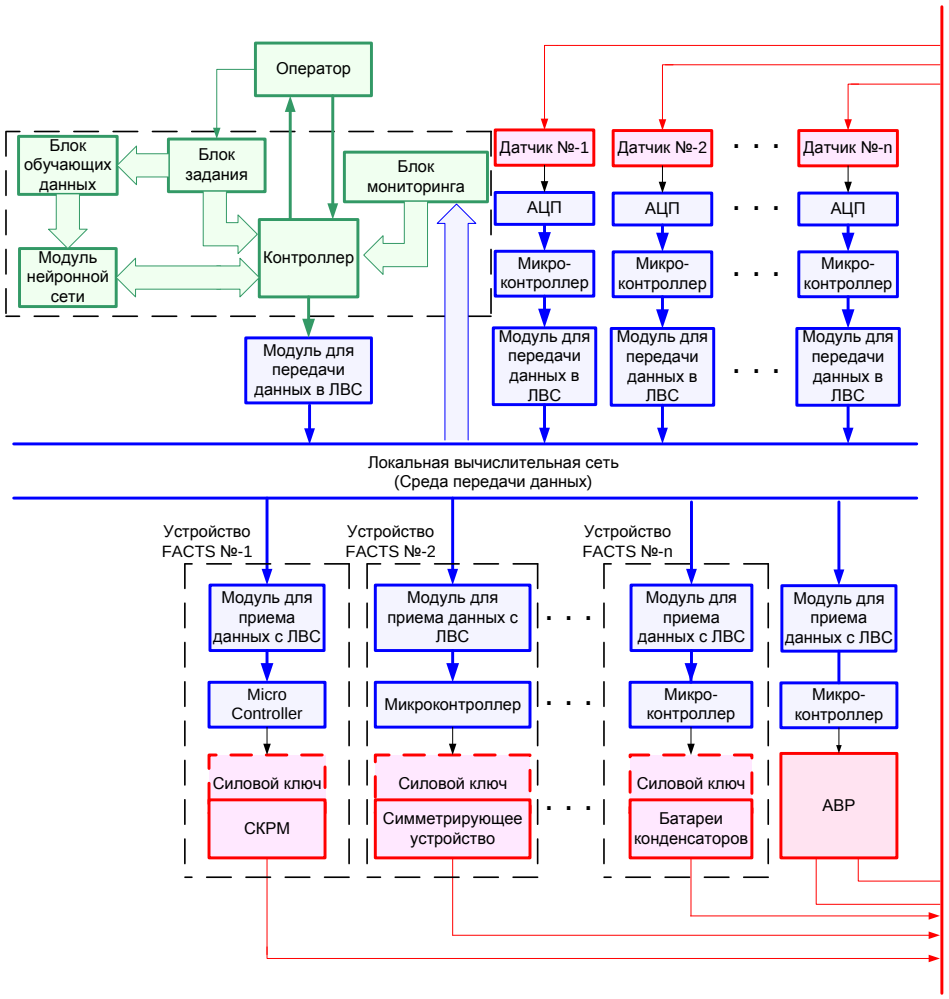


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга распределительной электрической сети цеха предприятия

Передача данных мониторинга осуществляется с использованием Ethernet технологий через локально-вычислительную сеть, которая имеет легко масштабируемую архитектуру.

Следует отметить, что ряд современных распределительных сетей характеризуется резкопеременным потреблением реактивной мощности. Из этого обстоятельства вытекает необходимость введения в структуру управляющего мониторинга блока нейронных сетей с прогнозированием режимных ситуаций.

Прогнозирование нагрузок должно выполняться на основе данных мониторинга, причем следует отметить, что характер изменения активных и реактивных нагрузок практически совпадает. Следовательно, для прогнозирования реактивных нагрузок выбираются искусственные нейронные сети (ИНС), действующие на основе математической теории нечетких множеств, так называемые нечеткие сети.

Такие сети имеют конфигурацию, представленную на рис. 2.

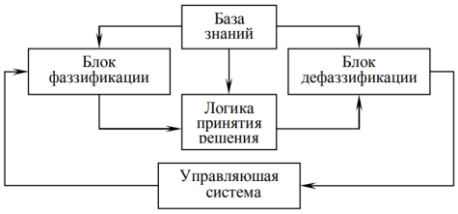


Рис. 2. Конфигурация схемы управления нейронной сетью

Обработка нечеткой информации заключается в следующем. Данные с датчиков распределительной сети цеха переводятся в значения лингвистических переменных в блоке «фаззификатор». Следующим этапом выполняется процедура нечеткого вывода на множестве продукционных правил, таким образом формируются выходные лингвистические значения, которые переводятся в точные значения результатов вычислений в блоке «дефаззификатор». Выходные данные «дефаззификатора» формируют управляющие воздействия на исполнительные механизмы. Такая схема является основой нечеткого контроллера, используемого в системах интеллектуального управления.

Ключевым блоком конфигурации сети является блок логики принятия решений. Основываясь на правилах нечетких множеств, сеть принимает решение о характере нагрузки. Решения принимаются в результате прохождения сигналов через структуру нейронной сети, состоящей из последовательностей нейронов, которые являются преобразовательными элементами. Преобразование происходит посредством передаточной функции. В частности, для прогнозирования нагрузок методом нечетких множеств применяется колоколообразная, треугольная либо трапециевидная форма.

Колоколообразная функция имеет следующий вид:

$$\mu_f(x) = \exp - \left(\frac{x - u_f}{\delta_f} \right)^{2bf} . \quad (1)$$

Для прогнозирования нагрузок была выбрана структура трехслойной нейронной сети (рис. 3), которая является наиболее оптимальной с точки зрения достоверности и быстродействия обрабатываемых сигналов, а также соответствия следующим требованиям:

– сеть должная состоять из одного промежуточного слоя;

– количество нейронов промежуточного слоя должно быть равным половине суммы выходного и входного слоев;

– выходной слой должен состоять из одного нейрона, который определяет прогнозное значение нагрузки.

Первый слой вычисляет функцию принадлежности для каждого входного сигнала, выходные значения слоя являются результатами, соответствующими каждому правилу нейрона.

Во втором слое вычисляется результат для каждого нечеткого правила.

В третьем слое вычисляется результат по всей структуре нейронной сети и формируется четкий вывод.

Непосредственно прогнозирование нагрузки заключается в принятии решений на основе данных мониторинга распределительной сети. Для этой цели применяется метод инверсии нейронной сети (инверсия нейронной сети – процесс определения входного вектора для получения желаемого выхода при наборе сигналов). Такой метод позволяет соотнести входные данные (данные с датчиков) и значения, характеризующие, например, соответствующий аварийный режим, наброс нагрузки и др.

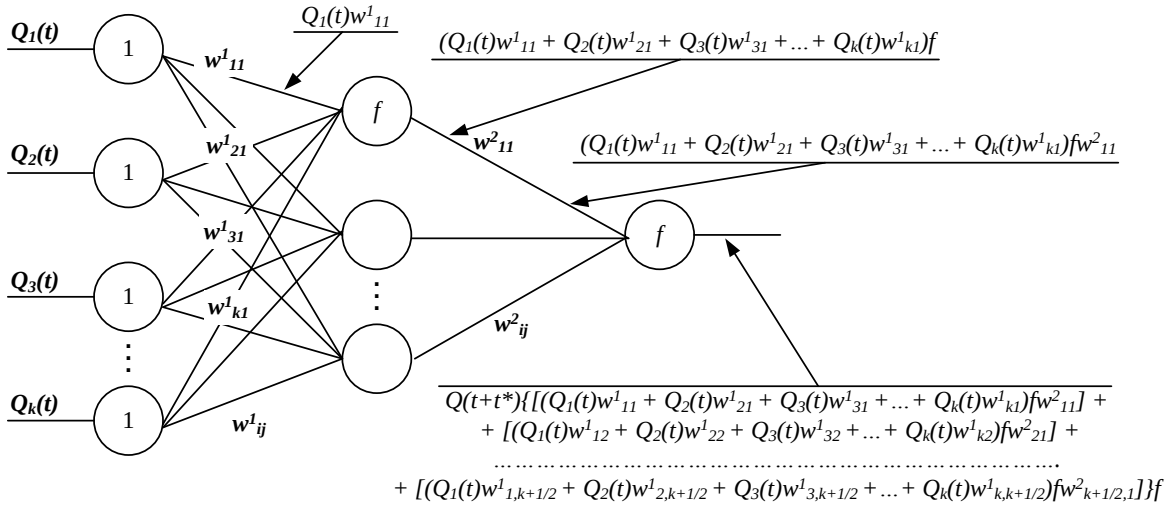


Рис. 3. Структура ИНС для прогнозирования реактивной нагрузки

Задача инверсии для единичной выборки заключается в минимизации погрешности между реальными и прогнозными значениями.

Обучающая последовательность составляет $5 \cdot 10^4$ выборок. Обучение ИНС выполнено на процессоре Celeron 1800, время обучения – 10 с с числом итераций обучения 300–500.

Характер потребления реактивной мощности и параметры нагрузки цеха постоянно меняются, что требует периодической адаптации значений весов модели прогнозирования. Для этого рекомендуется использовать модель сети на основе топологического метода, позволяющего осуществлять быстродействующую процедуру переобучения ИНС на новых выборках данных.

Корректирующие воздействия на параметры электрической сети должны опираться на прогнозные значения параметров нагрузки, которые должны быть максимально приближены к реальным значениям. Максимальная приближенность возможна только в случае хорошо обученной нейронной сети, что достигается при наличии массива данных, соответствующих связанным значениям входных и выходных параметров. Подобные значения могут быть получены в результате моделирования всех возможных режимов распределительной сети.

Современная распределительная сеть предприятия представляет собой сложную распределенную систему с постоянно меняющимися параметрами, режимами работы и структурой. При этом необходимо учитывать, что на современном промышленном предприятии невозможно проведение полномасштабных экспериментальных исследований в силу технологических, технических, экономических и других причин.

Из вышеизложенного следует, что любое полномасштабное моделирование распределительной сети возможно только как имитационное моделирование.

Модель может быть построена на основе анализа энергетических процессов в электрической сети классическим методом с составлением и решением системы уравнений Кирхгофа. Однако это представляет собой достаточно сложный и трудоемкий процесс, требующий большого внимания и определенного опыта [5].

Для создания подобной обучающей модели предлагается использовать метод объединенных матриц, суть которого заключается в следующем [6, 7]. Исследуемую электрическую сеть заменяют электромагнитной цепью, под которой понимается совокупность электрических и магнитных цепей, связанных системой обмоток. Процессы такой цепи описываются системой уравнений для комплексных переменных:

$$\begin{aligned} E_K &= Z_K^E I_K + Z_K^{EM} \Phi_K; \\ 0 &= Z_K^{ME} I_K + Z_K^M \Phi_K, \end{aligned} \qquad (2)$$

где Z_K^E, Z_K^M, Z_K^{EM}, Z_K^{ME} – матрицы контурных сопротивлений электрической цепи, магнитной цепи, электромагнитной и магнитоэлектрической связи; E_K, I_K – матрицы контурных ЭДС и контурных токов.

Решением этой системы является матрица контурных токов:

$$I_K = \left[Z_K^E - Z_K^{EM} \left(Z_K^M \right)^{-1} Z_K^{ME} \right]^{-1} E_K . \quad (3)$$

Матрицы контурных сопротивлений, ЭДС и токов связаны с матрицами ветвевых сопротивлений Z_K^E, ветвевых ЭДС E_B и токов I_B соотношениями:

$$\begin{aligned} &E_K = \Gamma_{EE} E_B ,\ I_B = \Gamma_{EE}^T I_K ; \\ &Z_K^E = \Gamma_{EE} Z_B^E \Gamma_{EE}^T , \end{aligned} \quad (4)$$

где Γ_{EE} – контурно-ветвевая матрица электрической цепи, элементами которой g_{ij} являются числа 1, – 1 или 0 в зависимости от следующих условий: входит в *i*-й контур *j*-я ветвь в том же направлении; входит в него в противоположном направлении; вообще с ним не связана.

В соответствии с (3) и (4) для сети, не содержащей трансформаторных элементов, получим следующее выражение:

$$I_B = \Gamma_{EE}^T \left(\Gamma_{EE} Z_B^E \Gamma_{EE}^T \right)^{-1} \Gamma_{EE} E_B . \quad (5)$$

С помощью матрицы I_B и комплексно сопряженной матрицы $\tilde{I}_B$ может быть получена матрица мощностей:

$$S_B = I_B .* diag(Z_B^E) * \tilde{I}_B , \quad (6)$$

где *diag* – функция, формирующая матрицу-столбец диагональных элементов из диагональных элементов матрицы Z_B^E, являющейся аргументом; операция (.*) соответствует поэлементному умножению элементов матриц.

Если представить распределительную сеть параллельным соединением потребителей с действующей в ней гармонической ЭДС *E* с внутренним сопротивлением r_0, сопротивлениями нагрузок Z_1, Z_2,…, Z_n, подключенными посредством проводов, обладающих сопротивлениями z_1, z_2,…, z_n, то матрицы сопротивлений и матрицы ЭДС будут иметь следующий вид:

$$Z_{B<n+1,n+1>}^E = \left(\begin{array}{c|cccc} z_0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ \hline 0 & Z_1 + z_1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 + z_2 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & Z_n + z_n \end{array} \right),$$

$$E_{B<n+1,1>} = \begin{pmatrix} E \\ \hline 0 \\ ... \\ 0 \end{pmatrix}_{<n+1,1>} . \quad (7)$$

Матрица сопротивлений проводов *z* имеет активную *r* и индуктивную *L* составляющие:

$$z = r + j\omega L . \quad (8)$$

Компоненты матрицы активных сопротивлений могут быть определены через их размеры. В частности, для матрицы активных сопротивлений имеем

$$r = \frac{4}{\pi} \begin{pmatrix} \frac{\rho_1 l_1}{d_1^2} & 0 & ... & 0 \\ 0 & \frac{\rho_2 l_2}{d_2^2} & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & ... & \frac{\rho_n l_n}{d_n^2} \end{pmatrix} = \frac{4}{\pi} \rho l d^{-2}, \quad (9)$$

где

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & \rho_2 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & ... & \rho_n \end{pmatrix}, \ l = \begin{pmatrix} l_1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & l_2 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & ... & l_n \end{pmatrix},$$

$$d = \begin{pmatrix} d_1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & d_2 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & ... & d_n \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Результаты исследования. Параметры проводных соединений распределительной сети конкретного цеха заносятся в данные матрицы сопротивлений, на основе которых формируются значения токов, мощностей и напряжений в требуемых узлах сети.

Приведенные матричные соотношения будут использованы для формирования образов протекающих процессов в рассматриваемой цепи, а также для решения ряда задач анализа.

Представленная матричная модель рассматриваемой сети учитывает все параметры проводящих линий и работу потребителей практически в реальном режиме времени, что обеспечивает более высокое быстродействие системы управления на основе мониторинга сети, по сравнению с применением в модели других топологических методов.

Однако реальная распределительная сеть цеха представляет большую совокупность радиальных и магистральных линий и наличие множества нагрузок с разнохарактерным потреблением мощности, а также с нелинейными вольт-амперными характери-

стиками. В этом случае система анализа представляет собой сложную структуру, не позволяющую быстро оценивать изменяющиеся параметры сети. Для этого предлагается произвести блочное деление отдельных участков и осуществлять быстродействующий анализ методом селекции для каждого интересуемого блока.

Варианты блочного представления исходной и преобразованной схем приведены на рис. 4,а и рис. 4,б соответственно, где факт исключения части контуров компенсируется заменой матрицы контурных сопротивлений Z_K^E на матрицу Z_Σ; утолщенными линиями при этом выделена группа оставшихся Z_{11}, Z_{13}, Z_{31}, Z_{31}, а тонкими – группа Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{32}, исчезнувших в результате преобразования блоков.

Система уравнений (4) соответствует преобразованию приведенной на рис. 5 и содержащей r контуров с источниками ЭДС, q контуров с нагрузками и p промежуточных контуров исходной электрической цепи (ЭЦ) к эквивалентной ЭЦ, изображенной на рис. 6, отличающейся от исходной тем, что из нее исключены все промежуточные контуры.

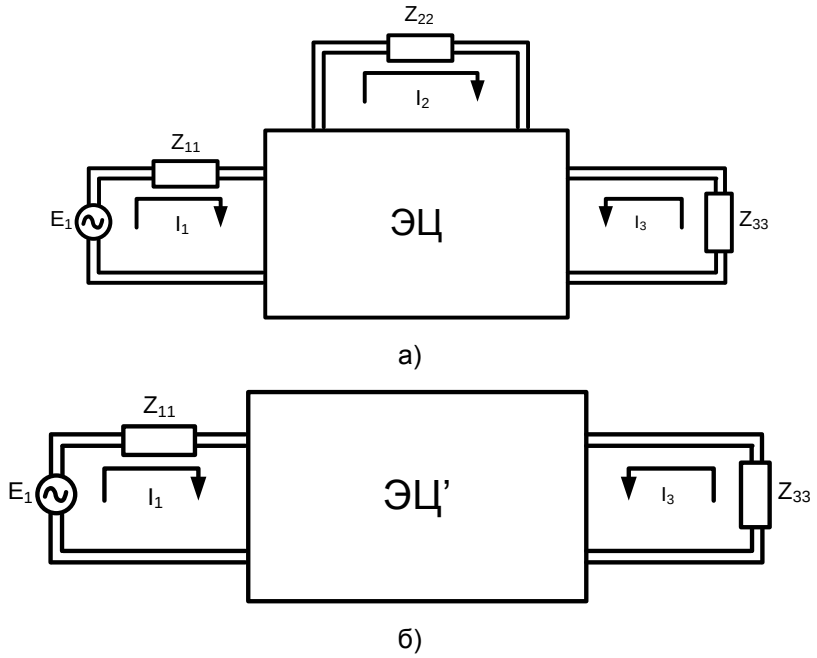


Рис. 4. Блочные варианты схем: а – исходной; б – преобразованной

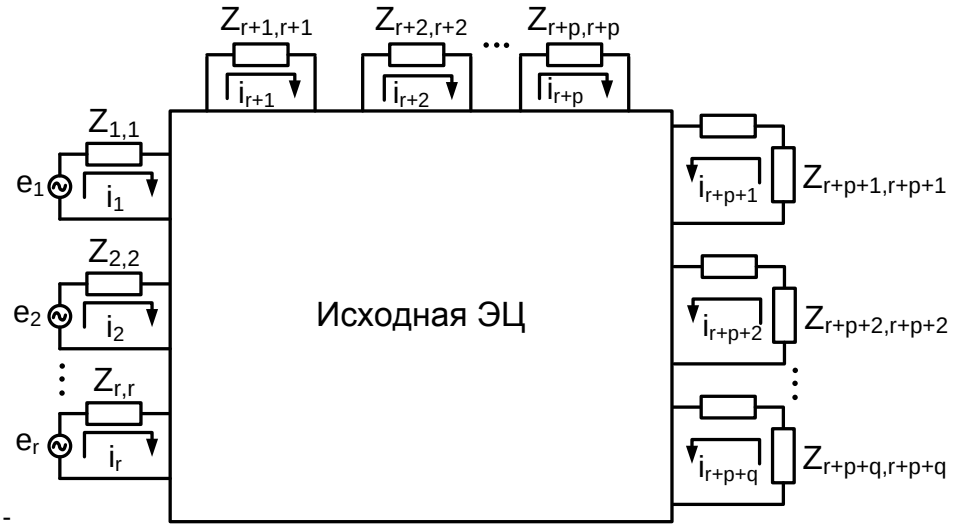


Рис. 5. Схема исходной электрической цепи



Рис. 6. Схема эквивалентной электрической цепи

Для произвольной ЭЦ, содержащей n контуров и описываемой матричным уравнением

$$E = ZI \tag{11}$$

матрицы ЭДС будут иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} E(1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{c|ccc|c} Z(1,1) & Z(1,2) & \dots & Z(1,n-1) & Z(1,n) \\ \hline Z(2,1) & Z(2,2) & \dots & Z(2,\text{n-1}) & Z(2,n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z(n-1,1) & Z(n-1,2) & \dots & Z(n-1,n-1) & Z(n-1,n) \\ \hline Z(n,1) & Z(n,2) & \dots & Z(n,n-1) & Z(n,n) \end{array}\right) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ I(n) \end{pmatrix}. \tag{12}$$

Из (12) следует:

$$\begin{aligned} &Z_{11} = Z(1,1), && Z_{12} = Z(1,2:n-1), && Z_{13} = Z(1,n), \\ &Z_{21} = Z(2:n-1,1), && Z_{22} = Z(2:n-1,2:n-1), && Z_{23} = Z(2:n-1,n), \\ &Z_{31} = Z(n,1), && Z_{32} = Z(n,2:n-1), && Z_{33} = Z(n,n) \end{aligned} \tag{13}$$

и

$$I(n) = -Z_{33\Sigma}^{-1} Z_{31\Sigma} \left(Z_{11\Sigma} + \Delta Z_{11\Sigma}\right)^{-1} E(1), \tag{14}$$

где

$$Z_{11\Sigma} = Z(1,1) - Z(1,2:n-1) Z^{-1}(2:n-1,2:n-1) Z(1,n);$$

$$Z_{33\Sigma} = Z(n,n) - Z(n.2:n-1) Z^{-1}(2:n-1,2:n-1) Z(2,n-1,n);$$

$$Z_{13\Sigma} = Z(1,n) - Z(2:n-1,1) Z^{-1}(2:n-1,2:n-1) Z(2:n-1,n);$$

$$Z_{31\Sigma} = Z(n.1) - Z(n.2:n-1) Z^{-1}(2{:}n-1,2{:}n-1) Z(2:n-1,1);$$

$$\Delta Z_{11\Sigma} = -Z_{13\Sigma} Z_{33\Sigma}^{-1} Z_{31\Sigma}.$$

Следует отметить, что в общем случае нумерация контуров не соответствует принятому допущению. Поэтому, чтобы сделать результаты более универсальными, введем в анализ две матрицы: матрицу перестановок номеров источников $P(j,1)$ и матрицу перестановок номеров нагрузок $L(k,n)$, которые составлены таким образом, чтобы произведение $P(j,1)E_K$ осуществляло перестановку 1-го и j-го элементов вектора ЭДС E_K, а произведение $L(k,n)I_K$ – перестановку n-го и k-го элементов вектора токов I_K.

Учитывая, что произведение матрицы на ее транспонированную матрицу дает единичную матрицу, из (14) получим эквивалентную запись:

$$\begin{aligned} &L(k.n)I(n) = -L(k.n) Z_{33\Sigma}^{-1} Z_{31\Sigma} \times \\ &\times \left(Z_{11\Sigma} + \Delta Z_{11\Sigma}\right)^{-1} P^T(j,1) P(j,1) E(1). \end{aligned} \tag{15}$$

На основании свойств матрицы перестановок

$$P(j,1)E(1) = E(j),\ L(k,n)I(n) = I(k)$$

из выражения (14) получим выражение для тока

$$\begin{aligned} &I(k) = -L(k.n) Z_{33\Sigma}^{-1} Z_{31\Sigma} \times \\ &\times \left(Z_{11\Sigma} + \Delta Z_{11\Sigma}\right)^{-1} P^T(j,1) E(j). \end{aligned} \tag{16}$$

Введем функцию селекции цепи

$$i_{mnk} = is(Z,E,mf,j,k), \quad (17)$$

определяющую в ЭЦ с заданной матрицей контурных сопротивлений Z комплексную амплитуду тока, вызванного действием m-й гармоники источника ЭДС $e(t) = Ee^{jk\omega t}$, находящегося в j-м контуре, на нагрузку k-го контура.

Для ее вычисления воспользуемся матричным соотношением

$$i_{mnk} = -L(k.n)Z_{33\Sigma}^{-1}(jm\omega)Z_{31\Sigma} \times \times\left[Z_{11\Sigma}(jm\omega) + \Delta Z_{11\Sigma}(jm\omega)\right]^{-1} P^T(j,1)E(j), \quad (18)$$

при этом все блоки сопротивлений определяются приведенной выше системой уравнений (13).

Предлагаемый метод блочной селекции с использованием программы MATLAB позволяет определять амплитуды и действующие значения токов любой гармоники в любом контуре ЭЦ с известными сопротивлениями, вызванными действием заданных источников ЭДС в электрической цепи при наличии потребителей с нелинейной ВАХ. Метод так же позволяет решать задачи оптимизации сети по следующим критериям: минимизации потерь от протекания реактивных токов в электрической сети; обеспечению экономически обоснованного cosφ, и формировать образы для модуля нейронной сети и, соответственно, управляющие сигналы на корректирующие устройства.

Следует отметить, что в качестве корректирующего исполнительного устройства рекомендуется применять быстродействующий компенсатор, позволяющий непрерывно отслеживать поток реактивной мощности в рассматриваемом узле или линии и обладающий высокими удельными технико-экономическими показателями. В настоящее время наибольшее распространение получили СКРМ, построенные по принципу косвенной системы компенсации (рис. 7). В подобном СКРМ параллельно конденсаторной батарее большой емкости C подключается тиристорно-регулируемый дроссель L [8].

При изменении угла управления тиристоров VS1–VS2 во всем диапазоне регулирования индуктивная проводимость дросселя изменяется от максимального значения до нуля, а эквивалентная проводимость СКРМ при этом изменяется от минимального до максимального значения. Недостатками такой СКРМ являются большие массогабаритные показатели и удельные потери элементов: конденсаторной батареи, дросселей и тиристорных регуляторов.

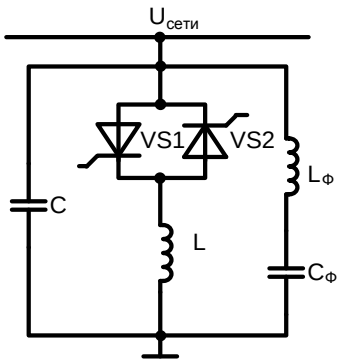


Рис. 7. СКРМ косвенной системы компенсации реактивной мощности

Наиболее приемлемым вариантом СКРМ, имеющим лучшие удельные показатели и аналогичные динамические характеристики, является статический компенсатор, выполненный на базе магнитовентильных элементов (МВЭ), однофазное исполнение которого представлено на рис. 8 [3].

Работа СКРМ на базе МВЭ представляет интерес с точки зрения быстродействия и минимизации удельных массогабаритных показателей. Его работа основана на переключении посредством VS ключа двух предельных состояний, которые характеризуются максимальной генерируемой мощностью (ключ закрыт) и минимальной реактивной (нулевой) мощностью (ключ открыт). Для первого режима характерно состояние, когда конденсатор C находится под большим напряжением посредством вольтодобавки. При втором режиме, когда ключ открыт, конденсатор "отсекается" от сети и имеет с ней только электромагнитную связь [2].

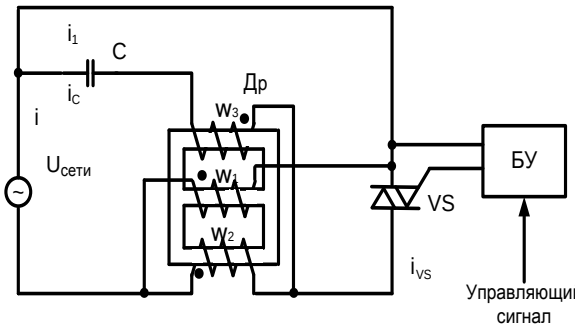


Рис. 8. СКРМ на базе магнитовентильных элементов

Для амплитуды первой гармоники тока СКРМ можно получить соотношение для реактивной мощности – мощности сдвига, являющейся функцией угла управления тиристоров α [9]:

$$Q(\alpha) = -\frac{U_m I_{Im\text{Э}}}{2\pi}[\pi - (\beta - \alpha) + \sin(\beta - \alpha)]\sin\varphi_{(1)} + \\ + \frac{U_m I_{IIm\text{Э}}}{2\pi}[(\beta - \alpha) - \sin(\beta - \alpha)]\sin\varphi_{(1)}, \quad (19)$$

где $\varphi_{(1)}$ – угол сдвига фазы первой гармоники тока относительно напряжения сети; β – угол проводимости тиристора.

Регулировочная характеристика СКРМ на базе МВЭ представлена на рис. 9.

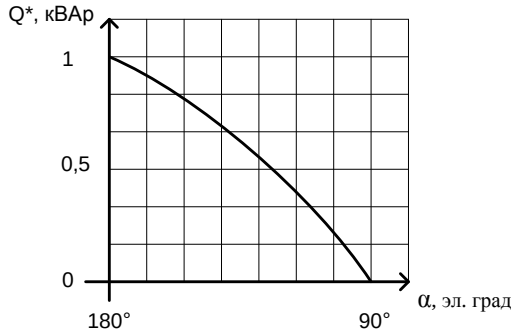


Рис. 9. Регулировочная характеристика СКРМ на базе магнитовентильных элементов

Как показал анализ электрических параметров, предлагаемый вариант компенсатора обладает высокими удельными показателями: $Q_{\text{др}} = 0{,}5\ Q_{\text{СКРМ}}$; $Q_{\text{КБ}} = 0{,}5\ Q_{\text{СКРМ}}$; $I_{VS} = 0{,}3\ I_{\text{ном}}$; $\Delta P = 10$ Вт/кВАр (ΔP – удельные потери мощности в СКРМ).

Выводы. Применение в системе мониторинга параметров распределительной сети с корректирующим управлением модуля нейронной сети позволяет оптимизировать перетоки реактивной мощности и поддерживать заданные значения напряжений в узлах сети при резкопеременном характере потребления реактивной мощности. Точность поддержания заданных значений напряжения, как показали результаты испытаний, составляет 95 %. Для обучения нейронной сети формируется модель рассматриваемой распределительной сети цеха с параметрами проводной системы электроснабжения и нагрузок, которая реализована по методу объединенных матриц [10]. Предлагаемая топологическая модель позволяет оптимизировать сеть по желаемым критериям, минимизировать потери на реактивную мощность в целях выбора и установки устройств компенсации реактивной мощности и управления ими.

Для обеспечения быстродействия при обучении нейронной сети, а также корреляции [11] управляющих воздействий на силовые исполнительные устройства предлагается использовать модель сети с селекцией отдельных кластеров. При этом коррекция управляющих воздействий происходит практически в реальном режиме времени.

Использование в качестве быстродействующего корректирующего устройства СКРМ на базе магнитовентильных элементов в комбинации с тиристорноподключаемыми конденсаторными батареями дополнительно повышает эффективность компенсации реактивной мощности в сетях с резкопеременным характером потребления электрической энергии.

Список литературы

1. **Бейсенов К.С.** Проблемы и перспективы развития электроэнергетики в современных условиях // Молодой ученый. – 2017. – № 20(154). – С. 235–237.

2. **Манин А.В., Вайнер Д.Б.** Быстродействующее симметрирующее устройство на базе магнитовентильных элементов одноплечевой нагрузки // Annali d'Italia. – 2021. – Vol. 1, No. 16. – P. 74–79.

3. **Статический** компенсатор реактивной мощности на базе магнитовентильных элементов / А.В. Манин, А.В. Юдин, А.Н. Грошев, О.А. Москалева // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. – 2011. – № 1(19). – С. 117–122.

4. **Билалова А.И.** Разработка моделей прогнозирования в сфере энергосбережения // Молодежь. Наука. Технологии (МНТК-2017): сб. науч. тр. Междунар. науч-техн. конф. студентов и молодых ученых. – Новосибирск, 2017. – С. 11–15.

5. **Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф.** Искусственные нейронные сети и их приложения. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.

6. **Юдин В.В.** Расчет линейных электромагнитных цепей методом объединенных матриц // Электричество. – 1987. – № 7. – С. 63–67.

7. **Ребенков Е.С.** Теория электромагнитного поля: учеб. пособие / ФГБОУВО «РХТУ им. Менделеева». – Новомосковск, 2017. – 71 с.

8. **Кобзистый О.В., Юндин М.А.** Комбинированное компенсирующее устройство на реактивных элементах // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – № 54. – С. 46–50.

9. **Манин А.В., Юдин А.В., Вайнер Д.Б.** Регулятор реактивной мощности для комбини-

рованной компенсирующей установки // Гуманитарные, естественно-научные и технические аспекты современности: материалы XXXIII Всерос. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Ростов н/Д, 2021. – С. 317–321.

10. **Симонов Н., Ивенев Н.** Опыт и перспективы применения искусственных нейронных сетей в электроэнергетике // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № S4(15). – С. 42–48.

11. **Свид.** о государственной регистрации RU 2675620 C1 от 21.12.2018. Способ управления мощностью статического компенсатора реактивной мощности, работающего в сети синусоидального переменного напряжения / Д.И. Панфилов, М.Г. Асташев. – Роспатент, 2018.

References

1. Beysenov, K.S. Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki v sovremennykh usloviyakh [Problems and promising trends for development of electric power industry in modern conditions]. *Molodoy uchenyy*, 2017, no. 20(154), pp. 235–237.

2. Manin, A.V., Vayner, D.B. Bystrodeystvuyushchee simmetriruyushchee ustroystvo na baze magnitoventil'nykh elementov odnoplechevoy nagruzki [High-speed balancing device based on single-arm load magnetic valve elements]. *Annali d'Italia*, 2021, vol. 1, no. 16, pp. 74–79.

3. Manin, A.V., Yudin, A.V., Groshev, A.N., Moskaleva, O.A. Staticheskiy kompensator reaktivnoy moshchnosti na baze magnitoventil'nykh elementov [Static reactive power compensator based on magnetic valve elements]. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii imeni P.A. Solov'eva*, 2011, no. 1(19) pp. 117–122.

4. Bilalova, A.I. Razrabotka modeley prognozirovaniya v sfere energosberezheniya [Development of forecasting models in the field of energy saving]. *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh «Molodezh'. Nauka. Tekhnologii (MNTK-2017)»* [Proceedings of research papers of international scientific and technical conference of students and young researches]. Novosibirsk, 2017, pp. 11–15.

5. Gafarov, F.M., Galimyanov, A.F. *Iskusstvennye neyronnye seti i ikh prilozheniya* [Artificial neural networks and their applications]. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 2018. 121 p.

6. Yudin, V.V. Raschet lineynykh elektromagnitnykh tsepey metodom ob"edinennykh matrits [Calculation of linear electromagnetic circuits by the method of combined matrices]. *Elektrichestvo*, 1987, no. 7, pp. 63–67.

7. Rebenkov, E.S. *Teoriya elektromagnitnogo polya* [Electromagnetic field theory]. Novomoskovsk, 2017. 71 p.

8. Kobzistyy, O.V., Yundin, M.A. Kombinirovannoe kompensiruyushcheye ustroystvo na reaktivnykh elementakh [Combined compensating device based on reactive elements]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2018, no. 54, pp. 46–50.

9. Manin, A.V., Yudin, A.V., Vayner, D.B. Regulyator reaktivnoy moshchnosti dlya kombinirovannoy kompensiruyushchey ustanovki [Reactive power controller for combined compensating unit]. *Materialy XXXIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Gumanitarnye, estestvennonauchnye i tekhnicheskie aspekty sovremennosti». V 2 ch. Ch. 1* [Proceedings of XXXIII all Russian scientific conference “Humanitarian, natural science, and technical aspects of today’s world”. In 2 part, part 1]. Rostov-na-Donu, 2021, pp. 317–321.

10. Simonov, N., Ivenev, N. Opyt i perspektivy primeneniya iskusstvennykh neyronnykh setey v elektroenergetike [Experience and promising trends to use artificial neural networks in the electric power industry]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2019, no. S4(15), pp. 42–48.

11. Panfilov, D.I., Astashev, M.G. *Sposob upravleniya moshchnost'yu staticheskogo kompensatora reaktivnoy moshchnosti, rabotayushchego v seti sinusoidal'nogo peremennogo napryazheniya* [Method to control power of static reactive power compensator operating in a sinusoidal alternating voltage network]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii RU 2675620 C1 ot 21.12.2018. Rospatent, 2018.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Андрей Ильич Тихонов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-28,
e-mail: aitispu@mail.ru

Андрей Александрович Каржевин
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-05, e-mail: drusja95@gmail.com

Александр Николаевич Голубев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-08

Алексей Вадимович Стулов
ООО «НПК “АВТОПРИБОР”», кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, Россия, Владимир, e-mail: alxstl@mail.ru

Имитационная модель силового трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом[1]

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одно из направлений цифровизации промышленности связано с понятием цифровых двойников, позволяющих имитировать работу реальных устройств в различных режимах. В настоящее время в среде MatLab Simulink SimPowerSystem разработаны имитационные модели трехфазного трансформатора стержневой конструкции, которые могут служить основой для создания цифрового двойника реального устройства. Проблема состоит в поиске наиболее универсального метода математического описания трансформатора произвольной конструкции, на основании которого можно создать его имитационную модель. Целью настоящего исследования является разработка имитационной модели трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом и исследование данной модели при работе трансформатора в установившихся и переходных режимах.
Материалы и методы. Использованы методы моделирования электрических цепей, построенных на основе теории обыкновенных дифференциальных уравнений, метод имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink SimPowerSystem.
Результаты. Оценены особенности конструкции трансформатора с броневым магнитопроводом и основные допущения при создании его имитационной модели. Построена система нелинейных уравнений для нахождения потоков и магнитодвижущей силы, создаваемых обмотками устройства. Разработана имитационная модель трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом на основе полученных уравнений с использованием блока Algebraic Constraint с

[1] Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 20-48-370001 от 19.01.2021.
The project is carried out with financial support of Russian Foundation for Basic Research (RFBR), local contest of Ivanovo region № 20-48-370001 dated 19.01.2021.

© Тихонов А.И., Каржевин А.А., Голубев А.Н., Стулов А.В., 2022
Вестник ИГЭУ, 2022, вып. 4, с. 46–52.

функцией алгебраического решателя Solver в MatLab Simulink SimPowerSystem. Приведены результаты моделирования динамических процессов в трансформаторе в различных режимах его работы.
Выводы. Результаты работы могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов в проектных организациях и в условиях производства. Также возможно использование разработанных моделей при эксплуатации силовых трансформаторов для анализа статических и динамических режимов работы участков электрических сетей.

Ключевые слова: цифровые двойники, имитационное моделирование трансформаторов, теория цепей, обыкновенные дифференциальные уравнения

Andrey Ilyich Tikhonov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Physics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-28, e-mail: aitispu@mail.ru

Andrey Alexandrovich Karzhevin
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-05, e-mail: drusja95@gmail.com

Aleksandr Nikolaevich Golubev
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Theoretical Basics of Electrical Engineering and Electric Technologies, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-08

Aleksey Vadimovich Stulov
NPK AVTOPRIBOR LLC, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Vice Director for Research, Russia, Vladimir, e-mail: alxstl@mail.ru

Simulation model of three-phase power transformer with twisted shell-type magnetic circuit

Abstract

Background. One of the areas of industry digitalization is associated with the concept of digital twins, which allow simulating the operation of real devices in various modes. At present, simulation models of a three-phase rod-type transformer have been developed in the MatLab Simulink SimPowerSystem environment. The models can serve as the basis to design a digital twin of a real device. The problem is to find the most universal method for mathematical description of a transformer of unspecified design to develop its simulation model. The purpose of this study is to develop a simulation model of a three-phase shell-type transformer core with a twisted magnetic circuit and to study this model when the transformer is operating in steady and transient modes.
Materials and methods. The authors have applied the methods to model electrical circuits based on the theory of ordinary differential equations, a simulation method using the MatLab Simulink SimPowerSystem software package.
Results. The structural futures of the transformers with shell-core design and the main assumptions when developing the simulation model have been assessed. A system of nonlinear equations has been developed to find the flows and MMF generated by the windings of the device. A simulation model of a three-phase shell-core transformer with a twisted magnetic core has been developed. It is based on the obtained equations using the Algebraic Constraint block with the Solver function in MatLab Simulink SimPowerSystem. The results of simulation of dynamic processes in the transformer in various modes are presented.
Conclusions. The results of the study can be used to design power transformers in engineering companies and under production conditions. It is also possible to use the developed models in case of power transformer operation to analyze the static and dynamic modes of operation of sections of electrical networks.

Key words: digital twins, transformer simulation, circuit theory, ordinary differential equations

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.046-052

Введение. Создание цифровых двойников силовых трансформаторов (ЦД СТ) является одним из перспективных направлений электротехники, находящихся в русле современной экономической политики России, связанным с цифровизацией экономики[2]. Под ЦД СТ в данном случае понимается компьютерная модель, описы-

[2] Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: https://asi.ru/nti.

вающая реальное устройство на основе двусторонней информационной связи с ним[3]. Развитие теории ЦД СТ идет в нескольких направлениях. Первое направление связано с использованием диагностических моделей эксплуатируемого устройства, позволяющих оценивать его исправность и прогнозировать его остаточный ресурс [1, 2]. Второе направление связано с созданием и использованием некоего виртуального объекта, способного адекватно воспроизводить работу реального устройства в произвольных режимах, в том числе нормальных, переходных, несимметричных и аварийных, с учетом особенностей конструкции конкретного устройства и возможных его неисправностей [3, 4, 5].

Использование ЦД СТ при проектировании позволяет сократить затраты на опытные образцы, так как появляется возможность оценивать результаты проектных решений без проведения дорогостоящих испытаний. Одним из начальных этапов создания ЦД является разработка имитационной модели трансформатора. В [4, 5] приведены результаты разработки уточненной имитационной модели трехфазного трансформатора обычной стержневой конструкции, способной стать основанием для создания ЦД СТ. При этом актуальной является задача, являющаяся развитием данных исследований, состоящая в создании имитационных моделей трансформаторов с другими исполнениями магнитной системы. В частности, ниже приведены результаты разработки и исследования имитационной модели бронестержневого трансформатора с витым магнитопроводом (рис. 1). Данная конструкция находит сегодня широкое применение, в первую очередь, в связи с внедрением в производство и эксплуатацию энергоэффективных силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали [6, 7].

Как показывает опыт, достаточная для цифровых двойников точность моделирования произвольных режимов работы трансформаторов может быть получена с использованием цепных моделей, параметры которых предварительно рассчитываются с использованием полевых моделей.

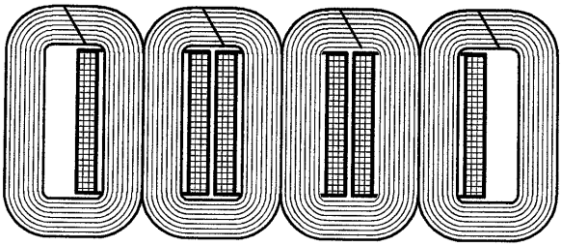


Рис. 1. Схема магнитопровода бронестержневого трансформатора из аморфной стали

Одним из наиболее популярных инструментов моделирования силовых электрических цепей с использованием трансформаторов является пакет MatLab Simulink SimPowerSysytems [8]. Данный пакет позволяет имитировать произвольные режимы работы СТ. Однако собственные модели трансформаторов в данной библиотеке закрыты для дальнейшего развития. В связи с этим была поставлена задача создания открытой имитационной модели СТ обозначенного исполнения.

Одновременно решалась задача разработки наиболее оптимального алгоритма создания имитационных моделей, который можно использовать при проектировании трансформаторов произвольной конструкции.

Методы исследования. Ранее был использован подход, основанный на принципе «идеального трансформатора» [4, 5]. Связь компьютерной модели с настоящим прототипом обеспечивается через задание кривой намагничивания магнитопровода, а также через задание экспериментально снятых параметров обмоток (сопротивлений и индуктивностей рассеяния). Данный подход был использован при создании математической модели нелинейного однофазного трансформатора с потерями, которая легла в основу модели трехфазного трансформатора стержневой конструкции.

Анализ показал, что данный подход весьма сложно распространить на случай трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом, так как система уравнений, описывающая магнитную цепь данного трансформатора, оказывается сложнее, что приводит к неоправданному усложнению фрагмента модели, отвечающего за расчет токов намагничивания различных фаз.

[3] ГОСТ Р 57700.37 – 2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт РФ. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2021. – Дата утверждения 16.09.2021.

Магнитопровод моделируемого трансформатора (рис. 1) изготовлен из 4 колец двух типоразмеров. Каждое кольцо намотано из электротехнической стали и имеет прямоугольное сечение. Особенностью подобной конструкции при расчете является то, что поток в каждом кольце можно считать отдельно, так как он замкнут по своему контуру, и что потоком нулевой последовательности, вследствие замыкания потоков по внешним кольцам, можно пренебречь.

Для формулировки системы уравнений, описывающих магнитную цепь, используем схему замещения магнитной системы трансформатора, приведенную на рис. 2. Так как конструкция трансформатора подразумевает магнитопровод, состоящий из нескольких отдельных колец, то мы получаем четыре отдельных контура, каждый со своим потоком. При этом катушки, расположенные на сердечниках, заменяются тремя источниками магнитодвижущей силы (МДС).

На рис. 2 приведены следующие обозначения: F_i – МДС, создаваемые обмотками первичной стороны; Φ_j – потоки, проходящие в каждом из колец; R_{mk} – магнитные сопротивления каждого отдельного кольца, вычисляемые по формуле

$$R_{mk} = \nu(B_k)\frac{\ell_k}{S}, \qquad (1)$$

где $\nu(B_k)$ – зависимость удельного магнитного сопротивления стали от магнитной индукции в k-й ветви; S – активное сечение магнитопровода; ℓ_k – длина средней линии магнитного поля кольца.

Система уравнений, описывающая магнитную цепь трансформатора, имеет вид

$$\begin{aligned}
&\frac{\Psi_1}{w_1} - \Phi_2 + \Phi_1 = 0,\\
&\frac{\Psi_2}{w_1} - \Phi_3 + \Phi_2 = 0,\\
&\frac{\Psi_3}{w_1} - \Phi_4 + \Phi_3 = 0,\\
&F_3 - \Phi_4 R_{m4} = 0,\\
&F_1 + \Phi_1 R_{m1} = 0,\\
&F_1 - F_2 - \Phi_2 R_{m2} = 0,\\
&F_2 - F_3 - \Phi_3 R_{m3} = 0,
\end{aligned} \qquad (2)$$

где Ψ_i – потокосцепление i-й обмотки; w_1 – количество витков в первичной обмотке трансформатора.

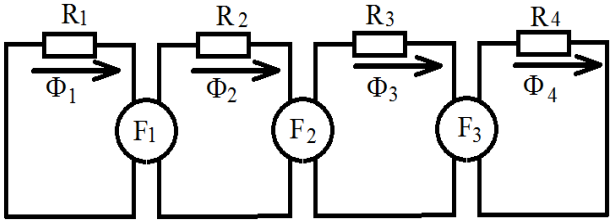


Рис. 2. Схема замещения магнитной системы бронестержневого трансформатора с витым сердечником

Всего система содержит 7 нелинейных уравнений, решение которых позволяет получить 4 магнитных потока в каждом кольце и 3 МДС, создаваемые первичными фазными обмотками. По найденным МДС обмоток можно найти намагничивающие токи трех фаз:

$$i_{0rk} = \frac{F_k}{w_1}, \qquad (3)$$

что, собственно, и является целью решения системы уравнений (2) на каждом шаге интегрирования по времени имитационной модели трансформатора.

Приведем данную систему уравнений к матричному виду:

$$\begin{bmatrix}
1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & -Rm_4 & 0 & 0 & 1\\
Rm_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\
0 & -Rm_2 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0\\
0 & 0 & -Rm_3 & 0 & 0 & 1 & -1
\end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{Bmatrix} \Phi_1\\ \Phi_2\\ \Phi_3\\ \Phi_4\\ F_1\\ F_2\\ F_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{\Psi_1}{w_1}\\ \frac{\Psi_2}{w_1}\\ \frac{\Psi_3}{w_1}\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0\\0\\0\\0\\0\\0\\0 \end{Bmatrix}, \qquad (4)$$

или

$$[\mathrm{R}]\{\mathrm{X}\} + \{\mathrm{F}\} = \{0\}. \qquad (5)$$

Решение данной системы уравнений осуществляется с помощью графического моделирования в пакете MATLAB Simulink SimPowerSystems. Алгоритм решения представлен на рис. 3.

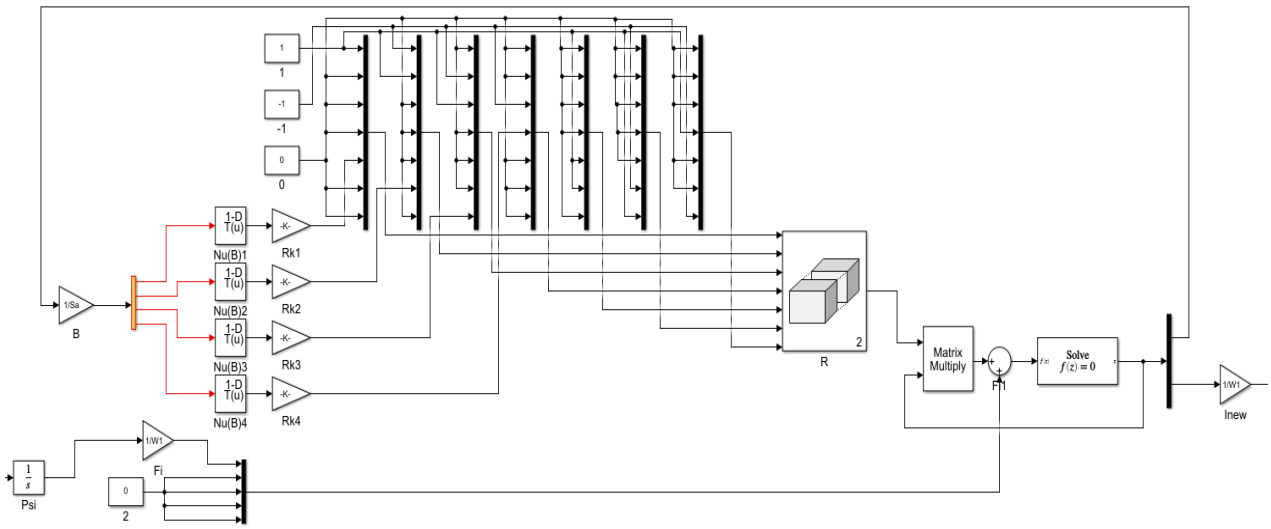


Рис. 3. Моделирование системы нелинейных уравнений в MATLAB Simulink SimPowerSystems

Поэлементно формируем основную нелинейную матрицу [R], которую затем умножаем на вектор неизвестных {X}, после чего прибавляем матрицу {F}, элементы которой рассчитываются путем интегрирования значений напряжений на ветвях намагничивания соответствующих стержней цепной части модели трансформатора (полная модель трансформатора представлена на рис. 4).

Для решения систем нелинейных уравнений в MATLAB Simlulink используется блок Algebraic Constraint с функцией алгебраического решателя Solver. На выходе этого блока мы получаем вектор-столбец с искомыми величинами. Найденные при этом магнитные потоки в кольцах умножаются на соответствующие магнитные сопротивления и подаются в матрицу [R], а из расчета МДС мы получаем токи намагничивания, которые подаются в схему замещения стержней трансформатора.

Следует отметить, что из-за использования алгебраического решателя скорость интегрирования модели снижается по сравнению с аналогичными моделями без использования блока Solver. Однако достоинством данного подхода является отсутствие необходимости как-либо упрощать или самостоятельно решать полученные уравнения.

Результаты исследований. На рис. 5 приведены кривые изменения токов первичных обмоток при включении трансформатора на холостой ход (а) и в установившемся режиме (б).

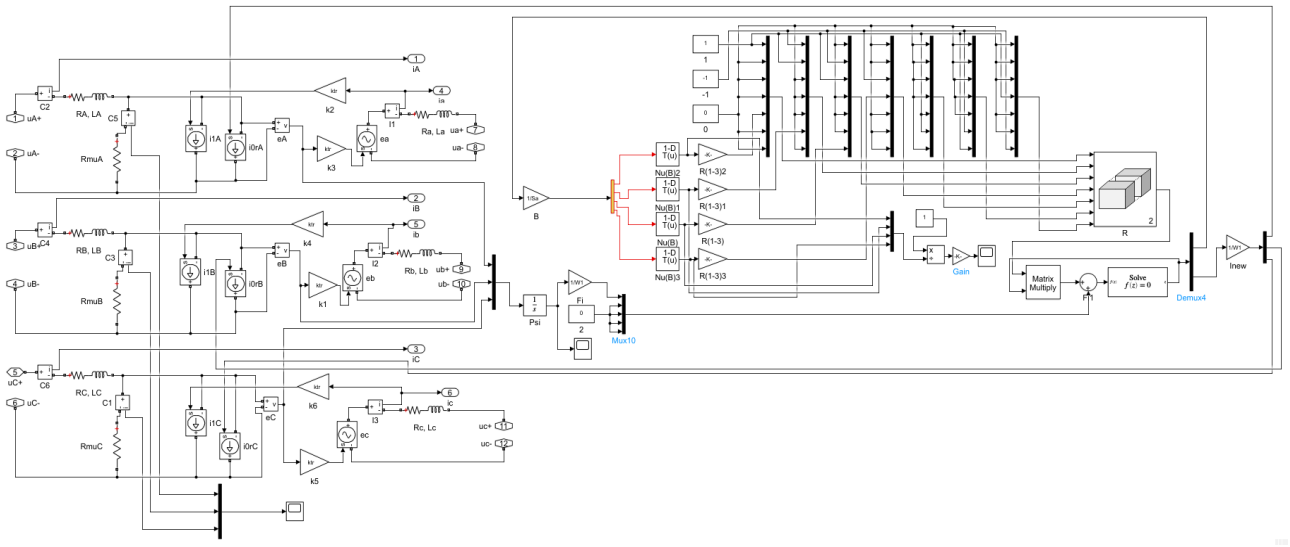
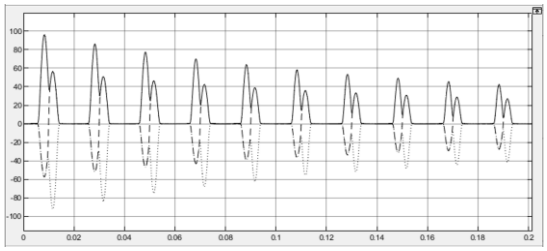
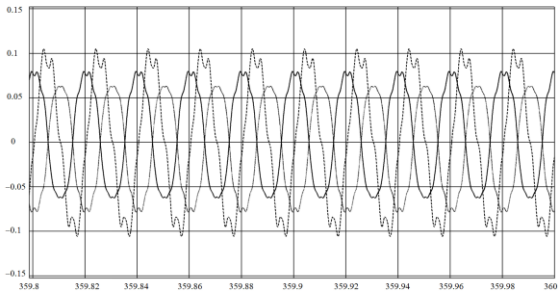


Рис. 4. Имитационная модель трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции



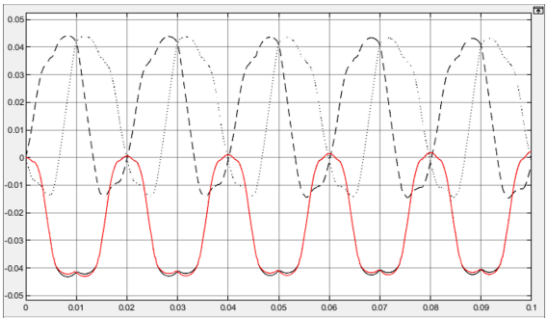
а)



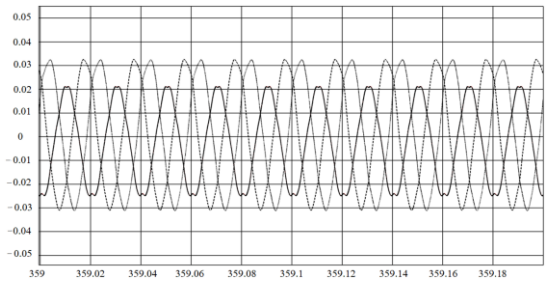
б)

Рис. 5. Кривые изменения токов первичных обмоток при включении трансформатора на холостой ход (а) и при установившемся режиме (б)

На рис. 6 показаны кривые изменения потоков в кольцах магнитопровода при включении трансформатора на холостой ход (а) и при установившемся режиме (б).



а)



б)

Рис. 6. Кривые изменения потоков в отдельных кольцах магнитопровода при включении трансформатора на холостой ход (а) и при установившемся режиме (б)

Анализ полученных кривых показывает, что магнитные потоки в крайних кольцах (нижние кривые на рис. 6,а и совпавшие кривые с меньшей амплитудой на рис. 6,б) практически полностью совпадают по фазе и амплитуде, что является интересным наблюдением и показывает, что суммарный поток равномерно распределяется по магнитной системе трансформатора.

На рис. 7 приведены кривые изменения потоков в стержнях трансформатора, создаваемых обмотками первичной стороны при установившемся режиме.

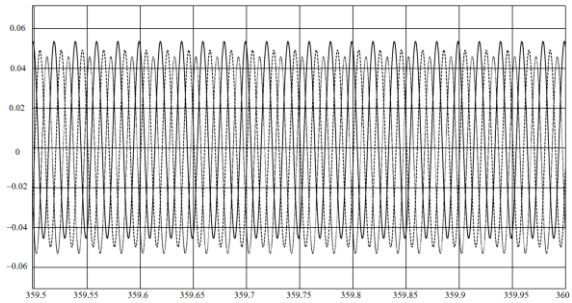


Рис. 7. Кривые изменения потоков в стержнях трансформатора в установившемся режиме

На рис. 8 приведены кривые изменения тока в первичных обмотках трансформатора при включении его на нагрузку. В первые секунды на эти кривые влияет постепенно уменьшающийся ток холостого хода. В установившемся режиме фазные токи становятся практически синусоидальными (на рис. 8 не показаны).

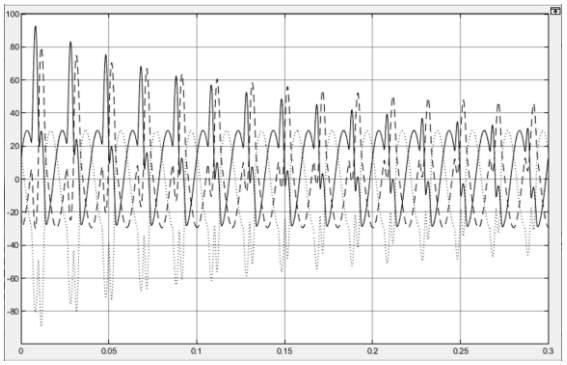


Рис. 8. Кривые изменения токов в первичных фазных обмотках при включении трансформатора на активную нагрузку

Выводы. Реализация имитационных моделей силовых трансформаторов зависит от особенностей конструкции магнитной системы. Не существует единой технологии, позволяющей строить модели произвольных, особенно нестандартных, вариантов конструкции.

В исследовании приведен подход, позволяющий уменьшить зависимость от исполнения магнитной системы при построении имитационной модели трансформатора. С использованием данного подхода появляется более универсальный способ создания имитирующих моделей

трансформатора. При этом упрощается способ математического описания физических процессов, происходящих внутри устройства, важно лишь правильно изобразить схему замещения магнитной цепи трансформатора. В качестве недостатка данного подхода можно отметить замедление работы модели по сравнению с традиционными имитационными моделями.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов в проектных организациях и на предприятиях трансформаторостроения.

Список литературы

1. **Дарьян Л.А., Конторович Л.Н.** Цифровые двойники электроэнергетического оборудования – основные принципы и технические требования // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 5(62). – С. 45–57.
2. **Дарьян Л.А., Конторович Л.Н.** Цифровые двойники электроэнергетического оборудования. Образы и экспертизы // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 1(64). – С. 124–129.
3. **Мартынов В.А., Голубев А.Н., Евдаков А.Е.** Анализ динамических режимов работы трехфазных трехстержневых трансформаторов в пакете MATLAB // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 4. – С. 11–18.
4. **Разработка** нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, А.А. Каржевин, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 1. – С. 22–31.
5. **Разработка** модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора / И.С. Снитько, А.И. Тихонов, А.В. Стулов, В.Е. Мизонов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47–56.
6. **Долинина Ю.** Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем // Электротехнический рынок. – 2012. – № 5–6. – С. 47–48. – Режим доступа: http://transformator.ru/press_center/the_press/2012/silovye-amorfnye-transformatory-budushchee-v-nastoyashchem
7. **Внедрение** аморфных трансформаторов в сеть. Переход на напряжение 20 кВ / И.Ф. Ахунянов, Ф.М. Улыбин, Ш.Г. Исмагилов, Н.К. Потапчук // Novainfo. – 2019. – № 106. – С. 12–17. – Режим доступа: https://novainfo.ru/article/17070
8. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

References

1. Dar'yan, L.A., Kontorovich, L.N. Tsifrovye dvoyniki elektroenergeticheskogo oborudovaniya – osnovnye printsipy i tekhnicheskie trebovaniya [Digital twins of electric power equipment – basic principles and technical requirements]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2020, no. 5(62), pp. 45–57.
2. Dar'yan, L.A., Kontorovich, L.N. Tsifrovye dvoyniki elektroenergeticheskogo oborudovaniya. Obrazy i ekspertizy [Digital twins of electric power equipment. Images and expertise]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. 1(64), pp. 124–129.
3. Martynov, V.A., Golubev, A.N., Evdakov, A.E. Analiz dinamicheskikh rezhimov raboty trekhfaznykh trekhsterzhnevykh transformatorov v pakete MATLAB [Analysis of the dynamic modes of operation of three-phase three-rod transformers in the MATLAB package]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 4, pp. 11–18.
4. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Karzhevin, A.A., Podobnyy, A.V. Razrabotka nelineynoy modeli trekhfaznogo transformatora dlya issledovaniya vliyaniya nesimmetrii magnitnoy sistemy na rabotu ustroystva v proizvol'nykh rezhimakh [Development of a nonlinear model of a three-phase transformer to study the influence of the asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 22–31.
5. Snit'ko, I.S., Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Mizonov, V.E. Razrabotka modeli perekhodnykh rezhimov s uchetom vzaimnoy induktivnosti poley rasseyaniya dlya realizatsii tsifrovogo dvoynika transformatora [Development of a model of transient modes, taking into account the mutual inductance of stray fields for the implementation of a digital twin of a transformer]. *Vestnik IGEU,* 2021, issue 4, pp. 47–56.
6. Dolinina, Yu. Silovye «amorfnye» transformatory. Budushchee v nastoyashchem [Power “amorphous” transformers. The future is in the present]. *Elektrotekhnicheskiy rynok*, 2012, no. 5–6, pp. 47–48. Available at: http://transformator.ru/press_center/the_press/2012/silovye-amorfnye-transformatory-budushchee-v-nastoyashchem.
7. Akhunyanov, I.F., Ulybin, F.M., Ismagilov, Sh.G., Potapchuk, N.K. Vnedrenie amorfnykh transformatorov v set'. Perekhod na napryazhenie 20 kV [Introduction of amorphous transformers into the network. Transition to voltage 20 kV]. *Novainfo*, 2019, no. 106, pp. 12–17. Available at: https://novainfo.ru/article/17070.
8. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

УДК 621.3+62-5

Игорь Сергеевич Полющенков
ООО НПО «Рубикон – Инновация», кандидат технических наук, инженер, отдел № 36, Россия, Смоленск, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Разработка программного обеспечения электропривода для группового управления в электромеханической системе

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для функционирования многокоординатных электромеханических систем требуется согласованное во времени и пространстве управление электроприводами по каждой из осей (групповое управление). Для этого предназначены различные вычислительные средства и математические алгоритмы, положенные в основу программного обеспечения микропроцессорных систем управления. При этом осуществлению управляющих алгоритмов препятствуют ограничения вычислительных ресурсов аппаратных средств систем управления, в том числе ограничения средств передачи информации. Учету и устранению таких ограничений, а значит, улучшению функционирования многокоординатных электромеханических систем способствует совершенствование управляющих алгоритмов и рациональное распределение вычислительных ресурсов систем управления электроприводов, что и является целью настоящего исследования.
Материалы и методы. Приведены материалы по разработке программного обеспечения для группового управления несколькими электроприводами в составе электромеханической системы, осуществляющими согласованное движение по ее осям во времени и пространстве. Для синхронизации управления ими применены следующие технические решения: описание траекторий контроллером верхнего уровня в виде последовательности опорных точек; буферизация их координат при получении электроприводами и последующая их интерполяция. Рациональное распределение ресурсов между контроллером верхнего уровня и локальными системами электроприводов осуществлено с учетом интенсивности обмена данными между ними по сетевому интерфейсу. Для описания исходной траектории в пределах допустимой ошибки при вычислении опорных точек контроллером верхнего уровня применено приближение траекторий отрезками прямых на интервалах времени переменной продолжительности.
Результаты. Предложен алгоритм синхронизации системного времени электроприводов и контроллера верхнего уровня, позволяющий синхронизировать интерполирование траекторий. Для осуществления этого алгоритма и передачи координат опорных точек электроприводам в их системах управления описаны специальные команды, имеющие различные уровни приоритета в зависимости от необходимой оперативности их выполнения. В соответствии с этим алгоритмом разработано программное обеспечение как элемент микропроцессорной системы управления электропривода.
Выводы. Применение различных технических средств и вычислительных алгоритмов, позволяющих распределить вычислительные ресурсы системы управления и рационально использовать их, способствует повышению эффективности, в частности согласованности и своевременности, управления электроприводами в составе многокоординатных электромеханических систем. Подтверждена эффективность подхода к групповому управлению электроприводами с применением буферизации координат опорных точек и последующей интерполяцией траекторий в зависимости от системного времени каждого из электроприводов.

Ключевые слова: интерполяция, система управления электропривода, микропроцессорное управление, цифровой интерфейс, взаимосвязанное управление электроприводами

Igor Sergeevich Polyuschenkov
LLC R&D Company “Rubicon – Innovation”, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Engineer, Department № 36, Russia, Smolensk, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Development of electric drive software for coordinated control in electromechanical system

Abstract

Background. To operate multi-coordinate electromechanical systems require control of electric drives coordinated in time and space along each of the axes, which is called coordinated control. Thus, various compu-

© Полющенков И.С., 2022
Вестник ИГЭУ, 2022, вып. 4, с. 53–63.

ting tools and mathematical algorithms are used. They establish the baseline of the software for microprocessor control systems. At the same time, the implementation of control algorithms is limited by the computing resources of the hardware parts of control systems, including the limitations of the tools of information transmission. To consider and eliminate these limitations and thus, to improve operation of the multi-coordinate electromechanical system, the aim of the article is to update control algorithms and balance distribution of computational resources of electric drives control systems.

Materials and methods. Data are presented on the software development for coordinated control of several electric drives as a part of an electromechanical system that performs coordinated motion along its axes in time and space. To synchronize the control, the following technical solutions have been applied: description of the path of the high-level controller in the form of a sequence of reference points, buffering the coordinates when received by the electric drives and subsequent interpolation. Balanced distribution of resources between the high-level controller and local systems of electric drives is carried out considering the intensity of data exchange via the network interface. When calculating the reference points by the high-level controller, approximation of the paths by line segments at time intervals of variable duration is carried out to describe the generic path within the allowable mismatch.

Results. The algorithm to synchronize the system time of the electric drives and the high-level controller has been implemented to synchronize the interpolation of paths. To implement this algorithm and transfer the coordinates of reference points to electric drives, special commands are used. They have different priority levels depending on the required speed of execution. In accordance with this algorithm, software has been developed as an element of the microprocessor control system of the electric drive.

Conclusions. Application of various technical tools and computational algorithms that make it possible to allocate the computing resources of the control system and rationally use them contributes to efficiency improvement, in particular, the consistency and timeliness of electric drives control as a part of multi-axis electromechanical systems. The authors have proved the efficiency of the approach of coordinated control with the use of buffering coordinates of reference points followed by interpolation of the paths depending on the system time of each of the electric drives.

Key words: interpolation, electric drive control system, microprocessor control, digital interface, coordinated control of electric drives

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.053-063

Введение. Электромеханические системы (ЭМС), имеющие как минимум две оси, по которым осуществляется движение, имеют функциональную взаимосвязь между пространственными координатами в зависимости от времени в каждой точке траектории. Движение таких систем по каждой из ее осей осуществляется электроприводами (ЭП), объединенными кинематической схемой и групповым, или взаимосвязанным, управлением, которое предназначено для согласования движений электроприводов во времени и в пространстве. Реализация группового управления электроприводами требует применения различных технических решений в локальных системах управления электроприводов (СУЭП) и в контроллере верхнего уровня (КВУ), которому они подчинены. Эти технические решения (например, [1–8]) касаются применения микропроцессорной техники и других управляющих и вычислительных средств с учетом достаточности их ресурсов для осуществления алгоритмов управления. Также они касаются математических основ для разработки вычислительных алгоритмов, положенных в основу программного обеспечения. Анализ этих технических решений показал, что трудности осуществления группового управления связаны с ограничениями вычислительных ресурсов средств управления, а также с ограничениями средств передачи информации между электроприводами и КВУ. Кроме того, применение различных технических решений требует рационального распределения вычислительных ресурсов между КВУ и локальными системами электроприводов, высвобождая их для выполнения других задач управления, что актуально ввиду ограниченности этих ресурсов.

Целью нашего исследования является разработка программного обеспечения для управления несколькими электроприводами в составе электромеханической системы. В этих электроприводах, разработка образца которых описана в [9], ранее осуществлены различные режимы движения, в том числе слежение – автоматическое регулирование положения при управлении по цифровым линиям связи.

Достижение поставленной цели связано с комплексным решением следующих задач, которые сформулированы на основе анализа материалов о различных техниче-

ских решениях [1–8] по теме разработки и результатах их использования:

- рассмотреть возможность рационального распределения вычислительных ресурсов между контроллером верхнего уровня и локальными электроприводами;
- провести анализ проблемы синхронизации управления электроприводами в составе ЭМС для согласованного движения ее осей во времени и в пространстве;
- экспериментально проверить предлагаемые технические решения с учетом ограничений технических средств.

Методы исследования. Рассмотрим организацию группового управления электроприводами от КВУ, которые соединены по сетевой шине Controller Area Network (CAN) согласно функциональной схеме, показанной на рис. 1. Контроллер верхнего уровня описывает пространственную траекторию движения электромеханической системы в виде геометрической суммы траекторий по каждой из ее осей.

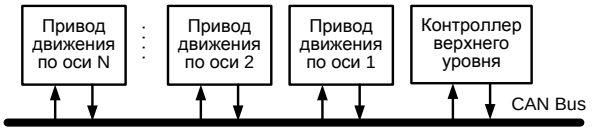


Рис. 1. Функциональная схема осуществления группового управления электроприводами в составе электромеханической системы

Использование сетевой шины CAN позволяет аппаратно осуществлять проверку контрольной суммы сообщений и проверку их соответствия диапазону адресов. Встроенные модули CAN имеются в современных микроконтроллерах, например STM32. В то же время ограничение скорости передачи данных и интенсивности обмена сообщениями по цифровым интерфейсам приводит к запаздыванию получения электроприводами сообщений по отношению к их отправке контроллером верхнего уровня. Это обстоятельство не позволяет электроприводам принимать от КВУ координаты точек траектории строго одновременно с их вычислением контроллером верхнего уровня, что является ограничением при осуществлении группового управления. Так, в разработанном ранее электроприводе [9] программный доступ к приемному буферу модуля CAN осуществляется с интервалом 8 мс, с чем связано запаздывание в отработке полученных координат в пределах этой величины. Для согласованного же движения ЭМС по различным осям все электроприводы должны получать заданные координаты непрерывно с учетом дискретности регулирования положения. Поэтому для обеспечения согласованности движения осей электромеханической системы групповое управление электроприводами обычно осуществляют с использованием описания траекторий КВУ в виде ряда опорных точек, буферизации их координат при получении с последующей интерполяцией траекторий электроприводами, что и реализовано в нашем исследовании.

На рис. 2 показана функциональная схема группового управления электроприводами, согласно которой опорные точки траекторий рассчитываются контроллером верхнего уровня, как это будет показано ниже, и отправляются в приемные буферы систем управления электроприводов.

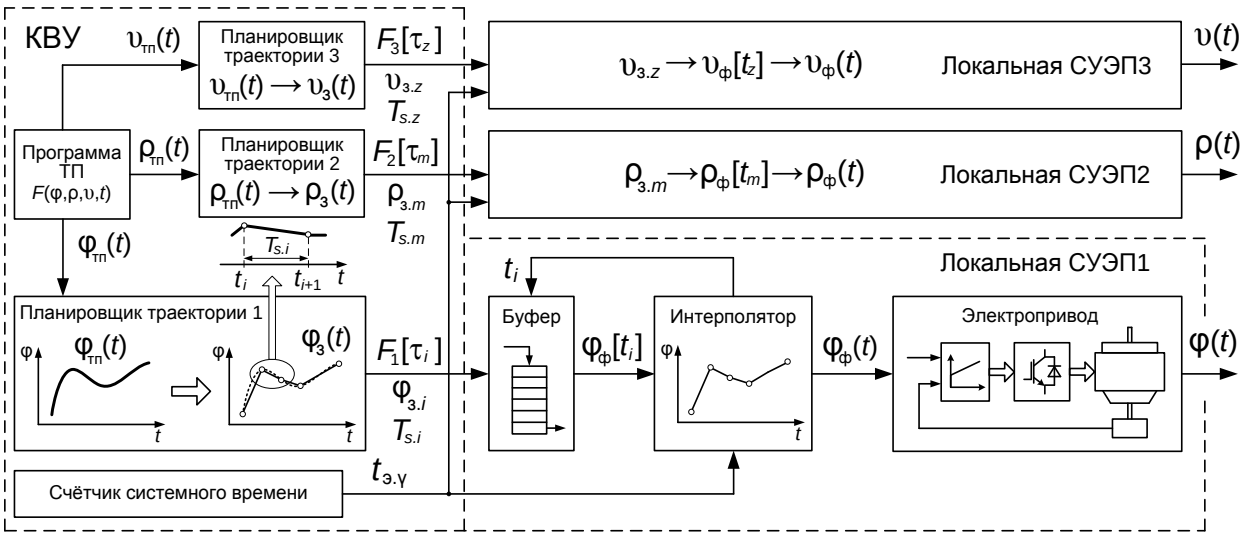


Рис. 2. Функциональная схема группового управления электроприводами с интерполяцией

Согласно этой схеме, программой технологического процесса (ТП) задана траектория ЭМС в виде функции $F(\varphi,\rho,\upsilon,t)$ трех пространственных координат, по одной на каждую ось ЭМС, и времени t. Контроллер верхнего уровня описывает траектории $\varphi_{тп}(t)$, $\rho_{тп}(t)$ и $\upsilon_{тп}(t)$ в виде функций $\varphi_з(t)$, $\rho_з(t)$ и $\upsilon_з(t)$. Они могут быть получены в результате приближения исходных траекторий $\varphi_{тп}(t)$, $\rho_{тп}(t)$ и $\upsilon_{тп}(t)$ математическими функциями, например отрезками прямых линий, проходящими через опорные точки $\varphi_{з.i} = \varphi_з[t_i]$, $\rho_{з.m} = \rho_з[t_m]$ и $\upsilon_{з.z} = \upsilon_з[t_z]$ в дискретные моменты времени t_i, t_m, t_z соответственно. Например, в электроприводе для движения по координате φ каждая i-я опорная точка $\varphi_{з.i}$ при расчете планировщиком траектории соотносится со следующей по порядку (i+1)-й опорной точкой $\varphi_{з.i+1}$ расстоянием $\Delta\varphi_i$ и интервалом дискретизации по времени $T_{s.i}$ следующим образом:

$$\varphi_{з.i+1} = \varphi_з[t_{i+1}] = \varphi_{з.i} + \Delta\varphi_i = \varphi_з[t_i] + \Delta\varphi_i . \qquad (1)$$

В свою очередь, интервал дискретизации имеет следующую величину:

$$T_{s.i} = t_{i+1} - t_i . \qquad (2)$$

Величина интервала дискретизации $T_{s.i}$, как и величины интервалов $T_{s.m}$, $T_{s.z}$ для других осей, имеет переменную величину, вычисляемую планировщиком при приближении исходной траектории $\varphi_{тп}(t)$ типовыми математическими функциями заданного вида при расчете опорных точек $\varphi_{з.i}$.

Эти точки, являясь наиболее значимыми для описания $\varphi_{тп}(t)$, $\rho_{тп}(t)$ и $\upsilon_{тп}(t)$, рассчитываются так, чтобы отклонения $\varphi_з(t)$, $\rho_з(t)$ и $\upsilon_з(t)$ от исходных траекторий не превышали некоторую допустимую величину. Чтобы подчеркнуть, что опорные точки у разных осей между собой несинхронны по времени, их координаты $\varphi_{з.i}$, $\rho_{з.m}$, $\upsilon_{з.z}$, соответствующие им моменты времени t_i, t_m, t_z и интервалы $T_{s.i}$, $T_{s.m}$, $T_{s.z}$ между ними имеют различные индексы – i, m, z соответственно. Чтобы учесть ограничение скорости передачи данных и интенсивности обмена сообщениями, координаты опорных точек $\varphi_{з.i}$, $\rho_{з.m}$, $\upsilon_{з.z}$ и интервалы времени $T_{s.i}$, $T_{s.m}$, $T_{s.z}$ между ними вычисляются планировщиками заранее по отношению к моментам времени t_i, t_m, t_z их использования электроприводами. Они отправляются электроприводам от КВУ в моменты времени τ_i, τ_m, τ_z в виде сообщений, которые можно в общем виде описать следующим образом:

$$F_1[\tau_i] = F_1(\varphi_{з.i}, T_{s.i})[\tau_i] ; \qquad (3)$$

$$F_2[\tau_m] = F_m(\rho_{з.m}, T_{s.m})[\tau_m] ; \qquad (4)$$

$$F_3[\tau_z] = F_3(\upsilon_{з.z}, T_{s.z})[\tau_z] . \qquad (5)$$

Согласно схеме группового управления электроприводами (рис. 2), принятые электроприводом координаты опорных точек $\varphi_{з.i}$ накапливаются в буфере. Поэтому моменты времени τ_i, а также τ_m, τ_z определяются контроллером верхнего уровня заранее по отношению к моментам времени t_i, t_m, t_z, чтобы сообщения $F_1[\tau_i]$, $F_2[\tau_m]$ и $F_3[\tau_z]$ успели быть приняты электроприводами до моментов времени t_i, t_m, t_z, в которые координаты опорных точек должны быть использованы при интерполяции. Кроме того, моменты времени τ_i, τ_m, τ_z при отправке сообщений от КВУ должны быть таковы, чтобы приемные буферы локальных электроприводов в процессе их движения своевременно пополнялись координатами, не опустели и не переполнились. Далее на примере оси φ координаты извлекаются из буфера в зависимости от времени t_i в виде последовательности $\varphi_ф[t_i]$ независимо от времени приема τ_i и расставляются интерполятором по оси времени t. На рис. 3 соотнесены моменты времени τ_i и t_i для управления по координате φ с выполнением условия $\tau_i < t_i$, причем $\varphi_ф[t_i] = \varphi_{з.i}$. Таким образом, буферизация координат $\varphi_{з.i}$, полученных от КВУ, позволяет использовать их при интерполяции строго в моменты времени t_i независимо от моментов времени τ_i их получения электроприводом.

Локальные системы ЭП рассчитывают координаты промежуточных точек между $\varphi_ф[t_i]$, $\rho_з[t_m]$ и $\upsilon_з[t_z]$, осуществляя интерполяцию траекторий $\varphi_ф(t)$, $\rho_ф(t)$ и $\upsilon_ф(t)$. Целью интерполяции, например, для электропривода по координате φ является вычисление функции $\varphi_ф(t)$, совпадающей с функцией $\varphi_з(t)$, заданной в виде массивов $\varphi_{з.i}$ и $T_{s.i}$. Моменту времени t_0, показанному на рис. 3, соответствует начало интерполяции. Далее в соответствии с $\varphi_ф(t)$ этот электропривод совершает движение $\varphi(t)$. При этом статические и динамические свойства электропривода обеспечиваются регулятором его замкнутого контура регулирования положения [9].

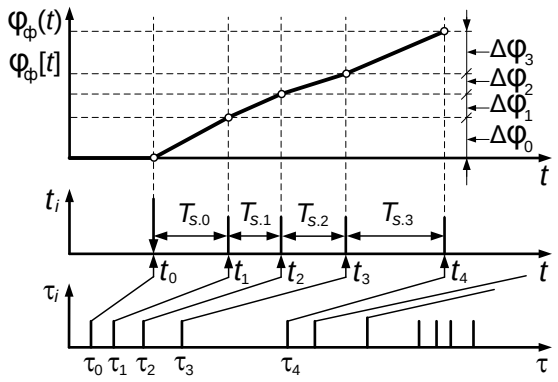


Рис. 3. Диаграмма расстановки опорных точек траектории во времени при буферизации

Рассмотрим на примере координаты φ вычисление КВУ последовательности опорных точек $\varphi_{з.i} = \varphi_з[t_i]$ с учетом достижения компромисса между точностью, информативностью, объемом передаваемых данных $F_1[\tau_i]$, а также объемом вычислений $\varphi_{тп}(t) \rightarrow \varphi_з[t_i]$, выполняемых КВУ, и объемом вычислений $\varphi_ф[t_i] \rightarrow \varphi_ф(t)$, выполняемых при интерполяции электроприводом. Под информативностью понимается достаточность последовательности опорных точек для описания траектории в пределах допуска по точности. Компактность, т. е. описание траектории минимальным числом точек, способствует снижению объема передаваемых данных и меньшей интенсивности обмена сообщениями между электроприводами и КВУ.

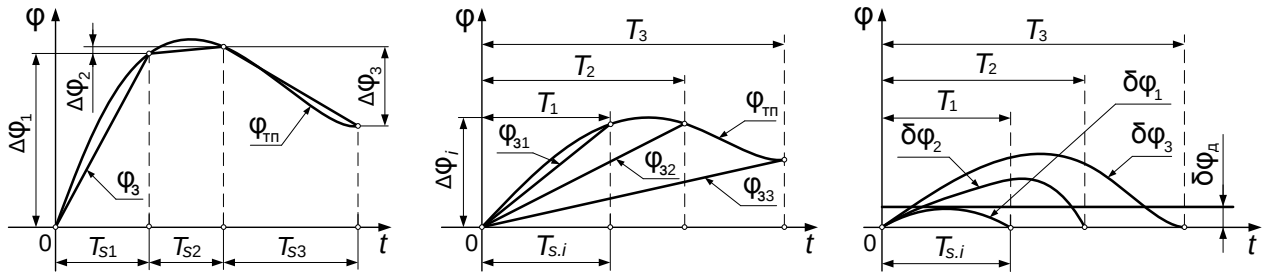
Сопоставление различных способов вычисления опорных точек [7, 8] приводит к выводу, что описание траектории $\varphi_{тп}(t) \rightarrow \varphi_з(t)$ отрезками линейных функций с переменным интервалом дискретизации $T_{s.i}$, как показано на рис. 4,а, позволяет детально описать динамичные участки при сокращении числа опорных точек на участках, менее динамично изменяющихся во времени. При этом снижается вычислительная нагрузка локальных систем электроприводов при интерполяции траекторий $\varphi_ф[t_i] \rightarrow \varphi_ф(t)$. Использование постоянного интервала дискретизации $T_{s.i} = T_s$ и аппроксимация траектории участками парабол [7, 8] такими полезными свойствами в полной мере не обладают. Такое представление траектории $\varphi_з(t)$ на i-м интервале времени $[t_i;\ t_{i+1}]$ описывается следующим образом:

$$\varphi_з(t) = \varphi_{з.i} + \frac{\Delta\varphi_i}{T_{s.i}} t\ . \qquad (6)$$

Величина $T_{s.i}$ для (6) рассчитывается по (2). Начальной точкой интервала $[t_i;\ t_{i+1}]$ принимается конечная точка предыдущего интервала. В опорных точках исходная траектория $\varphi_{тп}(t)$ совпадает с точками $\varphi_з(t)$, рассчитанными планировщиком (рис. 2).

Графики, показанные на рис. 4,б и рис. 4,в, дают геометрическую интерпретацию вычисления очередной (i+1)-й опорной точки по отношению к предыдущей i-й опорной точке при приближении гладкой траектории $\varphi_{тп}(t)$ отрезком прямой с достижением заданной точности на интервале между опорными точками. При этом на интервале T_1, принятом в результате вычислений в качестве $T_{s.i}$, отклонение $\delta\varphi_1$ находится в пределах допуска $\Delta\varphi_д$. Для данной траектории $\varphi_{тп}(t)$ увеличение интервала между опорными точками по сравнению с T_1, например, до T_2 или T_3 приводит к выходу отклонения из допуска $\Delta\varphi_д$.

При интерполяции $\varphi_ф[t_i] \rightarrow \varphi_ф(t)$ электроприводом необходимо учесть, как осуществлен переход $\varphi_{тп}(t) \rightarrow \varphi_з(t)$. Иначе через последовательность точек $\varphi_ф[t_i]$, показанных на рис. 3, при интерполяции можно провести траекторию $\varphi_ф(t)$ любой формы.



а) б) в)

Рис. 4. Вычисление опорных точек траектории при приближении отрезками с переменным шагом: а – приближение траектории отрезками прямых линий; б – определение интервала дискретизации; в – отклонение участка аппроксимированной траектории от исходной траектории на участке дискретизации

Так как при вычислении опорных точек $\varphi_з[t_i]$ используется описание траектории $\varphi_{тп}(t)$ отрезками прямых, то при расчете $\varphi_ф(t)$ электроприводом применена линейная интерполяция. Будучи элементом программного обеспечения электропривода, интерполятор рассчитывает координаты промежуточных точек $\varphi_{ф.i}[t_j]$ между соседними опорными точками $\varphi_ф[t_i]$ и $\varphi_ф[t_{i+1}]$ на i-м интервале времени $t \in [t_i;\ t_{i+1}]$ согласно выражению [7, 8] для численного решения дифференциальных уравнений:

$$\varphi_{ф.i}[t_{j+1}] = \varphi_{ф.i}[t_j] + \omega_i \Delta T , \qquad (7)$$

где $j \in [0;J_i]$ – индекс промежуточных точек на i-м интервале; ΔT – такт интерполяции, или интервал времени между ее итерациями; ω_i – первая производная по времени i-го участка траектории $\varphi_ф(t)$.

Величина названной производной i-го участка траектории, входящая в (7), рассчитывается следующим образом:

$$\omega_i = \frac{\Delta\varphi_i}{T_{s.i}} = \frac{\varphi_ф[t_{i+1}] - \varphi_ф[t_i]}{T_{s.i}} . \qquad (8)$$

Кратность J_i интервала времени $T_{s.i}$ между i-й и (i+1)-й опорными точками по отношению к такту интерполяции ΔT, равная числу опорных точек на этом интервале, может быть определена по формуле

$$J_i = \frac{T_{s.i}}{\Delta T} . \qquad (9)$$

Начальным значением координаты при j = 0 для численного интегрирования по (7) является координата $\varphi_{ф.i}[t_{j=0}] = \varphi_ф[t_i] = \varphi_з[t_i]$ для i-й опорной точки траектории.

Далее рассмотрим синхронизацию системного времени электроприводов. Чтобы интерполированная траектория $\varphi_ф(t)$ совпадала с $\varphi_з(t)$, вычисленной планировщиком, при интерполяции по (7) важен не только сам факт расчета очередной промежуточной j-й точки, но и выполнение этого расчета строго в определенный момент времени t_j. При этом счет системного времени ведется таймером, встроенным в микроконтроллер системы электропривода и тактируемым генератором тактовой частоты, а интервалы ΔT между итерациями формируются по прерыванию от этого таймера. Частота тактового генератора имеет некоторое отклонение по отношению к номинальной ее величине. Дополнительное отклонение тактовой частоты связано с влиянием температуры окружающей среды и влиянием параметров цепи для формирования тактовых импульсов при подключении к микроконтроллеру, поэтому действительные продолжительности интервалов ΔT и $T_{s.i}$, сформированные таймером, несколько отличаются от их заданных величин. При этом величина J_i равна заданной, так как число промежуточных точек в пределах $T_{s.i}$ рассчитывается по заданным, а не по сформированным системой управления величинам интервалов ΔT и $T_{s.i}$.

Если счет системного времени с учетом перечисленных выше обстоятельств имеет некоторую стабильность, то общее начало отсчета времени у различных устройств может быть установлено только внешним образом. Исходя из этого, при интерполяции траекторий системное время каждого электропривода необходимо синхронизировать с системным временем КВУ, установив единое начало отсчета системного времени t_{sN} = 0 каждого из электроприводов, ограничив рассогласование его счета в допустимых пределах и обеспечив в среднем одинаковый темп этого счета.

В схеме, показанной на рис. 2, счетчик системного времени $t_э$, принятого в качестве эталонного, формирует его дискретные отсчеты $t_{э.γ}$. Эти отсчеты времени несинхронны с опорными точками траектории и имеют отличный от них индекс γ. Взаимодействие КВУ с электроприводами при синхронизации иллюстрируется функциональной схемой, показанной на рис. 5.

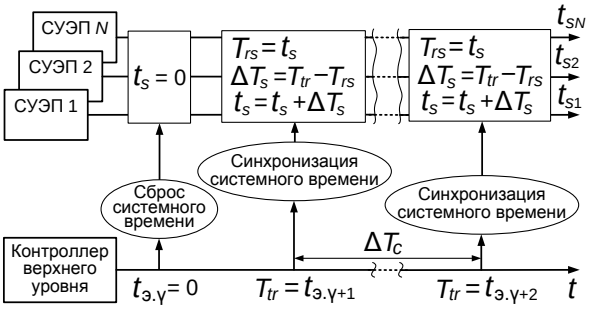


Рис. 5. Функциональная схема синхронизации системного времени электроприводов и КВУ

После однократного сброса системного времени КВУ $t_{э.γ}$ = 0 по команде сбрасывается системное время электроприводов t_{s1} = 0, t_{s2} = 0, …, t_{sN} = 0, индивидуальное для каждого из них. Далее КВУ через интервалы времени ΔT_c отправляет электроприводам команду на синхронизацию – широковещательное сообщение с указанием своего системного времени $T_{tr} = t_{э.γ}$. По-

лучив такое сообщение и зафиксировав свое нескорректированное системное время $T_{rs} = t_s$, каждый из электроприводов вычисляет рассогласование ΔT_s и осуществляет его коррекцию следующим образом:

$$\Delta T_s = T_{tr} - T_{rs}; \quad (10)$$

$$t_s = t_s + \Delta T_s. \quad (11)$$

В результате синхронизации согласно диаграммам на рис. 6 рассогласование счета системного времени $t_{s1} \div t_{sN}$ электроприводов не превышает величину ΔT по отношению к действительному времени t.

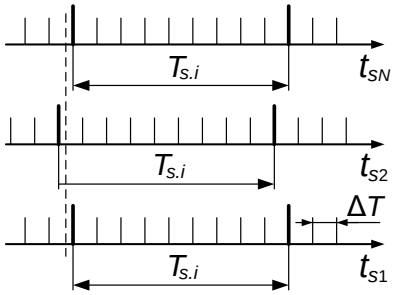


Рис. 6. Диаграммы счета системного времени электроприводами при синхронизации с КВУ

Для коррекции системного времени электропривода предложен алгоритм, который иллюстрируется графиками на рис. 7. Рассмотрим его осуществление подробно. Коррекция интерполирования траектории $\varphi_ф(t)$ осуществляется так, чтобы в контрольных точках она совпадала с траекторией $\varphi_э(t)$, заданной КВУ, по величине координаты и моменту времени. Системное время $t_э$ КВУ, принятое в качестве эталонного, и системное время электропривода t_s (рис. 7) соотносятся с действительным временем t следующим образом:

$$t_э(t) = t; \quad (12)$$

$$t_s(t) = kt, \quad (13)$$

где k – положительное число, причем $k \neq 1$ из-за несинхронности счета времени t_s и $t_э$.

Для простоты описания алгоритма синхронизации принято, что интервалы между опорными точками траектории $\varphi_э(t)$, рассчитываемой КВУ, имеют постоянную величину $T_э$, считаемую эталонной, а при интерполяции траектории $\varphi_ф(t)$ электроприводом используется также постоянный интервал T_s. Для совпадения $\varphi_э(t)$ и $\varphi_ф(t)$ в контрольных точках требуется, чтобы интервалы $T_э$ и T_s между ними были равны. Алгоритм распространяется и на случаи с интервалами $T_{s.i}$ и $T_{э.i}$, переменными в зависимости от i. Для совпадения $\varphi_э(t)$ и $\varphi_ф(t)$ требуется, чтобы выполнялось условие $T_{s.i} = T_{э.i}$. При синхронном счете времени $t_э$ КВУ и времени t_s электропривода требование $T_э = T_s$ выполняется с точностью до ΔT. Однако из-за несинхронности счета t_s по отношению к $t_э$ величина интервала времени T_s, формируемая интерполятором, как показано на рис. 7, не равна эталонному времени $T_э$, а интерполированная траектория $\varphi_ф(t)$ отклоняется от траектории эталонного вида $\varphi_э(t)$, которая была задана электроприводу, – либо отстает от нее по времени (рис. 7,а), либо опережает ее (рис. 7,б).

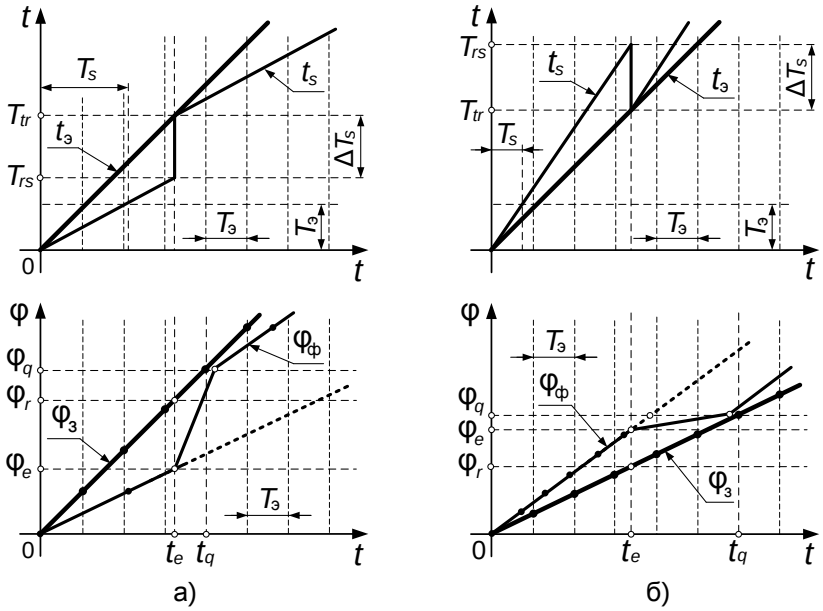


Рис. 7. Коррекция интерполяции траектории: а – при отставании интерполяции от системного времени КВУ ($\Delta T_s > 0$ по (10)); б – при опережении интерполяцией системного времени КВУ ($\Delta T_s < 0$ по (10))

На графике $\varphi_э(t)$ показаны опорные точки, которые к данному времени t должны быть учтены интерполятором при расчете траектории по эталонному времени $t_э = t$. На графике $\varphi_ф(t)$ показаны опорные точки, которые к данному моменту времени в действительности учтены интерполятором, использующим свое системное время $t_s \neq t_э$. В момент времени t_e при получении команды о синхронизации, в которой передается системное время T_{tr} от КВУ, система управления электропривода вычисляет ближайшую опорную точку с координатой φ_q, которая далее считается контрольной точкой.

Если $\Delta T_s = 0$, то синхронизации системного времени не требуется, так как $t_s = t_э$. При $\Delta T_s > 0$ системное время электропривода отстает от времени КВУ, что иллюстрируется графиками на рис. 7,а. В этом случае контрольной точкой с координатой φ_q является ближайшая опорная точка на эталонной траектории $\varphi_э(t)$, следующая за моментом времени t_e, но отстоящая от него более чем на один интервал $T_{s.i}$. Координата φ_q контрольной точки к моменту времени синхронизации t_e принята электроприводом от КВУ и находится в буфере. При $\Delta T_s < 0$, когда электропривод отсчитывает свое системное время t_s с опережением по отношению к времени КВУ, контрольная точка φ_q уже учтена интерполятором при расчете траектории $\varphi_ф(t)$ и является границей участка, который интерполировался в момент времени t_e. Эта точка находится на продолжении траектории $\varphi_ф(t)$, показанном на рис. 7,б пунктиром, которое к моменту времени t_e еще не было рассчитано. Так как для обоих случаев известна координата φ_q контрольной точки и момент времени t_q, который соответствует этой координате на эталонной траектории, то для расчета интерполированной траектории $\varphi_ф(t)$ на интервале $t \in [t_e; t_q]$ предназначено следующее выражение

$$\varphi_ф(t) = \varphi_e + \omega_e t , \qquad (14)$$

где ω_e – производная по времени, или скорость, для очередного участка скорректированной траектории.

Величина этой производной рассчитывается в зависимости от координат и моментов времени на границах интервала:

$$\omega_e = \frac{\varphi_q - \varphi_e}{t_q - t_e} . \qquad (15)$$

При расчете j-х промежуточных точек траектории для дискретных моментов времени t_j на интервале $[t_e; t_q]$ предназначено следующее выражение:

$$\varphi_ф[t_{j+1}] = \varphi_ф[t_j] + \omega_e \Delta T , \qquad (16)$$

где индекс j принадлежит отрезку $[0; J_q]$.

Число промежуточных точек интерполированной траектории на интервале $[t_e; t_q]$ имеет следующую величину:

$$J_q = \frac{t_q - t_e}{\Delta T} . \qquad (17)$$

После коррекции интерполированная траектория $\varphi_ф(t)$ совпадает с эталонной траекторией $\varphi_э(t)$ в контрольной точке с координатой φ_q для момента времени t_q:

$$\varphi_q = \varphi_ф(t_q) = \varphi_э(t_q) . \qquad (18)$$

Такая коррекция системного времени должна осуществляться с некоторой периодичностью для примерно одинакового темпа его счета всеми электроприводами.

Результаты исследования. Программное обеспечение ранее разработанного электропривода [9] было доработано для осуществления интерполяции траектории и синхронизации системного времени при управлении по сетевой шине CAN. При этом было учтено повышение вычислительной нагрузки на систему управления электропривода и вычислительные ресурсы ее микроконтроллера были перераспределены, чтобы выделить их для задач интерполяции и синхронизации. В зависимости от назначения, сообщения, передаваемые между устройствами в сети, разделены на три группы:

1) параметрические сообщения для управления электроприводами, в том числе для задания целевых координат, контроля текущих координат, задания режимов работы и параметров настройки. Такие сообщения адресованы каждому из электроприводов индивидуально;

2) короткие широковещательные, или контрольные, сообщения для поддержания связи электроприводов с КВУ и для передачи электроприводами информации о своем состоянии;

3) широковещательные команды для согласованного группового управления – команды синхронного начала и остановки движения, а также синхронизации с КВУ.

При разработке программного обеспечения электропривода использованы средства модельно-ориентированного программирования – библиотека Waijung Blockset из состава Matlab, что иллюстри-

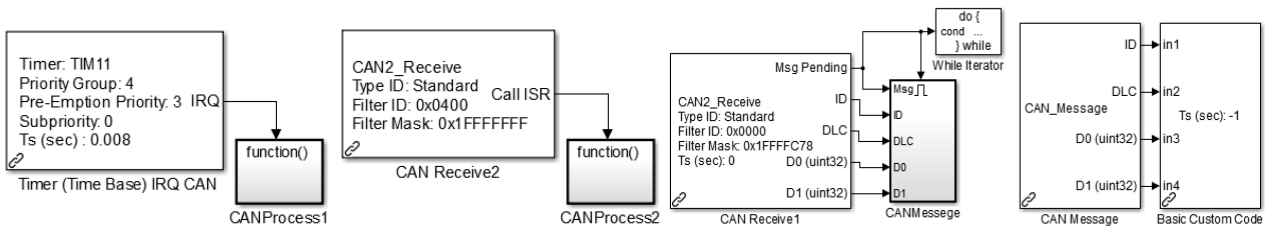
руется схемами на рис. 8. Модельные блоки использованы как конфигураторы и обработчики модулей микроконтроллера. Обработка принятых сообщений и формирование исходящих сообщений реализуются в виде подпрограмм на языке С, включенных в программное обеспечение с помощью блоков вида Basic Custom Code.

В сообщениях имеются поле кода команды и поле данных, а также программные идентификаторы устройств (показаны на рис. 9 в формате исходящего параметрического сообщения). Входящие параметрические сообщения и сообщения других групп имеют подобный формат. Признаками принадлежности сообщений к одной из групп являются идентификатор ID, который проверяется аппаратно модулем CAN, и длина сообщения DLC, проверяемая программно. Идентификатор для каждой из групп задан комбинацией маски (Filter ID) и фильтра (Filter Mask) модельных блоков CAN Receive, показанных на рис. 8.

Сообщения каждой из групп имеют разные приоритеты и последовательности обработки. КВУ передает группы по 6–8 параметрических и контрольных сообщений без временных интервалов. В связи с этим осуществлен следующий способ их обработки. Каждые 8 мс по прерыванию при переполнении таймера, которому назначен высокий 4 приоритет из 16 уровней приоритетов микроконтроллера STM32, принятые сообщения извлекаются из приемного буфера CAN. Далее они помещаются в очередь и отрабатываются через интервал 250 мкс по прерыванию при переполнении другого таймера с низким приоритетом, а модуль CAN накапливает вновь полученные сообщения. Команды третьей группы осуществляются вне общей очереди и по прерыванию, имеющему высокий 4 приоритет, возникающему после получения таких сообщений, которые аппаратно детектируются модулем CAN. Схемы для модельно-ориентированной разработки такого программного обеспечения показаны на рис. 8.

Чтобы согласовать такт интерполяции ΔT с дискретностью по времени регулятора положения электропривода и периодом выборки обратной связи по положению, равным 330 мкс [9], его продолжительность задана равной 1 мс.

В связи с этим минимальное рассогласование системного времени электропривода и КВУ, требующее коррекции, не должно превышать несколько таких интервалов ΔT. При типовом допуске частоты кварцевого резонатора 0,003 %, или 30 ppm, и частоте 25 МГц даже без учета дополнительных факторов такая величина рассогласования времени накапливается в течение нескольких секунд.



а) б) в) г)

Рис. 8. Модельные схемы для разработки программного обеспечения для обмена данными по CAN: а – обработчик прерывания при переполнении таймера; б – обработчик прерывания при получении сообщения модулем CAN; в – обработчик для доступа к приемному буферу CAN по прерыванию от таймера (подсистема CANProcess1); г – обработчик для доступа к приемному буферу по прерыванию от модуля CAN (подсистема CANProcess2)

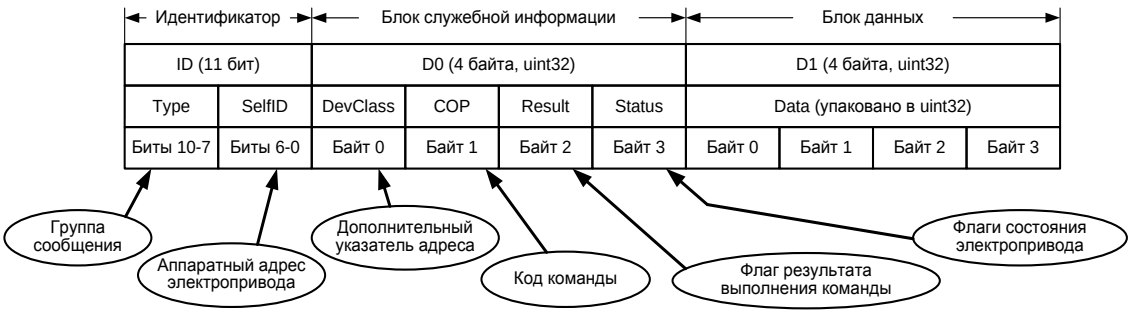


Рис. 9. Формат параметрического сообщения

При групповом управлении электроприводами с их подключением согласно схеме, показанной на рис. 1, было экспериментально установлено соблюдение последовательностей и приоритетов в обработке сообщений различных групп, описанных выше, в том числе широковещательных команд высокого приоритета для синхронизации системного времени, а также команд для одновременного начала движения и остановки всех электроприводов. Для отслеживания процесса интерполяции и синхронизации системного времени программное обеспечение электроприводов было модифицировано таким образом, что при получении от КВУ команды на синхронизацию они дополнительно фиксируют значения своего системного времени и параметров для интерполяции траектории, присутствующих в выражениях (10), (14), (15) и (16), которые сохраняются в программном журнале. Доступ к журналу осуществляется с помощью специального приложения для персонального компьютера [9]. При управлении электроприводами отслеживалось их системное время, отклонения ΔT_s системного времени от КВУ при получении команд на синхронизацию и скорректированные по (7) производные ω_e для каждого из участков траектории. По этим параметрам контролировалось расположение контрольных точек на интерполированных траекториях. В результате сопоставления данных, полученных от электроприводов, установлено, что без синхронизации после однократного сброса системного времени по команде от КВУ его счет электроприводами осуществляется таким образом, что отклонение в несколько миллисекунд, соизмеримое с несколькими тактами интерполяции ΔT, накапливается на интервале продолжительностью ΔT_c = 10 с, который заявлен в качестве рекомендуемого. Экспериментально установлено, что при коррекции системного времени согласно рассмотренному алгоритму у каждого из электроприводов оно устанавливается в пределах допуска ΔT_d = ±1 мс, который равен такту интерполяции ΔT, как показано на рис. 6. Следовательно, интерполяция траекторий согласована также в пределах одного такта ΔT = 1 мс. Этому способствует то обстоятельство, что время, затрачиваемое КВУ на формирование и передачу команд, учитывается его операционной системой при расчете T_{tr}, входящего в (10).

В программном обеспечении при коррекции интерполированной траектории учтены различные коллизии, возникающие, например, если при расчете по (10) имеется рассогласование системного времени $\Delta T_s > 0$, но опорная точка, которая должна стать контрольной точкой, не была отправлена электроприводу от КВУ.

Для дополнения группового управления электроприводами осуществлена их межсетевая коммуникация, при которой одни из них по линии связи USB – UART получает от персонального компьютера сообщения, адресованные либо ему, либо другим электроприводам, соединенным по сетевой шине CAN, как показано на рис. 10.

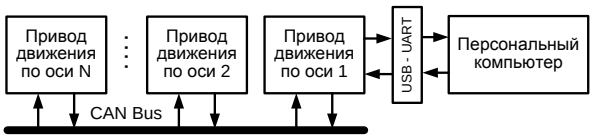


Рис. 10. Схема межсетевой коммуникации ЭП

Далее этот электропривод пересылает сообщения по сети, принимает ответные сообщения и пересылает их персональному компьютеру. Так как при межсетевой коммуникации не использованы буферизация принятых данных и интерполяция траекторий, то из-за ограниченной интенсивности обмена сообщениями и временных задержек, связанных с их детектированием, обработкой и пересылкой, она показала себя непригодной для своевременного задания координат движения при групповом управлении. В связи с этим использование межсетевой коммуникации ограничено настройкой электроприводов, установленных в технологическое оборудование, доступ к которым по индивидуальным линиям USB – UART затруднен, а также получением контрольной информации об их состоянии.

Выводы. Для рационального распределения вычислительных ресурсов между КВУ и локальными системами электроприводов с учетом интенсивности обмена данными между ними при вычислении опорных точек контроллером верхнего уровня применено приближение траекторий отрезками прямых на интервалах времени переменной продолжительности, которые рассчитываются так, чтобы в преде-

лах допустимой ошибки аппроксимировать исходную траекторию отрезками прямых.

Показана эффективность группового управления с буферизацией принятых электроприводами координат опорных точек траекторий и последующей интерполяцией траекторий в зависимости от системного времени каждого из них. Для передачи электроприводам от КВУ целевых координат опорных точек траекторий при управлении по сетевой шине CAN предложена система команд различных форматов и приоритетов в зависимости от назначения.

Реализация предлагаемых решений показала согласованность осуществления интерполяции траекторий электроприводами по опорным точкам, а также их синхронизации с системным временем КВУ с точностью в пределах одного такта интерполяции продолжительностью 1 мс.

Список литературы

1. **Global** Site of Fanuc Group [Электронный ресурс]. www.fanuc.com (дата обращения 25.04.2022).

2. **Xingbo Wang, Gang Chen, Liancheng Zeng.** A rapid and precise interpolator for CNC smooth curve interpolation // 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. – Wenzhou, 2009. – P. 879–883. DOI: 10.1109/CAIDCD.2009.5375092.

3. **Lin C., Liu W.** Numerical Control System Design Based on Surface Reconstruction Technology // 2016 International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE). – Hunan, 2016. – P. 425–428. DOI: 10.1109/ICSCSE. 2016.0118.

4. **Reference** Trajectory Modification Based on Spatial Iterative Learning for Contour Control of Two-Axis NC Systems / J. Li, Y. Wang, Y. Li, W. Luo // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – June 2020. – Vol. 25, no. 3. – P. 1266–1275. DOI: 10.1109/TMECH.2020.2973085.

5. **Spline-Based** Trajectory Generation for CNC Machines / T. Mercy, N. Jacquod, R. Herzog, G. Pipeleers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Aug. 2019. – Vol. 66, no. 8. – P. 6098–6107. DOI: 10.1109/TIE.2018.2874617.

6. **Guodong J.** Direct Numerical Control Techniques applications in local area network // Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. – Harbin, 2011. – P. 3388–3390. DOI: 10.1109/EMEIT.2011.6023813.

7. **Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.** Программирование систем числового программного управления: учеб. пособие. – М.: Логос, Университетская книга, 2008. – 344 с.

8. **Чикуров Н.Г.** Алгоритмическое и программное обеспечение компьютерных систем управления: учеб. пособие. – Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2008. – 225 с.

9. **Polyuschenkov I.** Model-oriented Programming Technique In The Development of Electric Drive Control System // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.

References

1. Global Site of Fanuc Group. www.fanuc.com (Date of appeal 25.04.2022).

2. Xingbo, Wang, Gang, Chen, Liancheng, Zeng. A rapid and precise interpolator for CNC smooth curve interpolation. 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, Wenzhou, 2009, pp. 879–883. DOI: 10.1109/CAIDCD.2009.5375092.

3. Lin, C., Liu, W. Numerical Control System Design Based on Surface Reconstruction Technology. 2016 International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), Hunan, 2016, pp. 425–428. DOI: 10.1109/ICSCSE. 2016.0118.

4. Li, J., Wang, Y., Li, Y., Luo, W. Reference Trajectory Modification Based on Spatial Iterative Learning for Contour Control of Two-Axis NC Systems. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, June 2020, vol. 25, no. 3, pp. 1266–1275. DOI: 10.1109/TMECH.2020.2973085.

5. Mercy, T., Jacquod, N., Herzog, R., Pipeleers, G. Spline-Based Trajectory Generation for CNC Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Aug. 2019, vol. 66, no. 8, pp. 6098–6107. DOI: 10.1109/TIE.2018.2874617.

6. Guodong, J. Direct Numerical Control Techniques applications in local area network. Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, Harbin, 2011, pp. 3388–3390. DOI: 10.1109/EMEIT.2011.6023813.

7. Sosonkin, V.L., Martinov, G.M. *Programmirovanie sistem chislovogo programmnogo upravleniya* [Programming of numerical control systems]. Moscow: Logos, Universitetskaya kniga, 2008. 344 p.

8. Chikurov, N.G. *Algoritmicheskoe i programmnoe obespechenie komp'yuternykh sistem upravleniya* [Algorithmic and software tools for computer control systems]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2008. 225 p.

9. Polyuschenkov, I. Model-oriented Programming Technique In The Development of Electric Drive Control System. 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.311.001.57

Андрей Владимирович Затонский
ФГАОУ ВО ПНИПУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Березниковский филиал), доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Россия, Березники, e-mail: zxenon@narod.ru

Игорь Сергеевич Долгополов
ФГАОУ ВО ПНИПУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Березниковский филиал), магистрант, Россия, Березники, e-mail: demarsel@mail.ru

Моделирование трехобмоточного силового трансформатора в Matlab Simulink

Авторское резюме

Состояние вопроса. Анализ энергоэффективности электрических сетей 110 кВ затруднен отсутствием возможности проведения экспериментов на действующем оборудовании, а именно на силовых трансформаторах. Существующие методики математического расчета электрических сетей не дают широкой возможности исследования режимов работы сетей 110 кВ. Вычислительные эксперименты в целях анализа энергоэффективности работы оборудования снижают риски повреждения оборудования и травмирования обслуживающего персонала, а также позволяют исследовать необходимые режимы работы электрической сети 110 кВ, включая силовые трансформаторы.
Материалы и методы. Модель трансформатора разработана в виртуальной лаборатории Matlab с помощью библиотеки Simpowersystem.
Результаты. Приведены паспортные данные трансформатора типа ТДТН-25000/110-У1. Исследовано применение схемы звезды вместо Т-образной схемы замещения в трехобмоточном трансформаторе. Разработаны виртуальные модели для проведения экспериментов короткого замыкания и холостого хода. Выполнен расчет кривой намагничивания сердечника трансформатора. С использованием предложенной виртуальной модели трансформатора типа ТДТН-25000/110-У1 исследованы процессы короткого замыкания и холостого хода. Показано соответствие результатов моделирования паспортным данным реального трансформатора. Получены осциллограммы броска тока намагничивания, также соответствующие реальным.
Выводы. Погрешность выполнения модели по сравнению с паспортными данными реального трансформатора не превышает 5 %. Модель рекомендуется использовать для анализа энергоэффективности электрических сетей 110 кВ. Перспективой исследования для данной модели силового трансформатора является добавление в модель условий работы регулятора напряжения под нагрузкой.

Ключевые слова: моделирование трехобмоточного трансформатора, схема замещения силового трансформатора, опыт холостого хода, напряжение короткого замыкания

© Затонский А.В., Долгополов И.С., 2022
Вестник ИГЭУ, 2022, вып. 4, с. 64–72.

Andrey Vladimirovich Zatonskiy
Perm National Research Polytechnic University (Berezniki branch), Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation of Technological Processes Department, Russia, Berezniki, e-mail: zxenon@narod.ru

Igor Sergeevich Dolgopolov
Perm National Research Polytechnic University (Berezniki branch), Master Degree Student, Russia, Berezniki, e-mail: demarsel@mail.ru

Simulation of three winding power transformer in Matlab Simulink

Abstract

Background. It is difficult to analyze the energy efficiency of 110 kV electrical networks due to the lack of the possibility to conduct experiments on operating equipment, namely on power transformers. The existing methods of mathematical calculation of electrical networks do not provide a wide opportunity to study the modes of 110 kV networks. Computational experiments to analyze the energy efficiency of equipment operation reduce the risks of equipment damage and injury of maintenance personnel. Also, it allows you to explore the necessary operation modes of a 110 kV electrical network, including power transformers.
Materials and methods. The transformer model is developed in the Matlab virtual laboratory using the Simpowersystem toolbox.
Results. The passport data of the transformer of the type TDTN-25000/110-U1 are given. The use of a star circuit instead of a T-shaped equivalent circuit is studied since the transformer has three windings. Virtual models are developed to conduct short circuit and open circuit experiments. The calculation of the magnetization curve of the transformer core is carried out. Using a new virtual model of a transformer of the TDTN-25000/110-U1 type, the processes of short circuit and open circuit are studied. The correspondence of the simulation results and the passport data of a real transformer is presented. The oscillograms of the magnetizing current inrush are obtained. They also correspond to the real ones.
Conclusions. The model error in comparison with the passport data of a real transformer does not exceed 5 %. The model is recommended to be used to analyze the energy efficiency of 110 kV electrical networks. The promising trend to research the model of a power transformer is to add the voltage regulator under load as the operation condition.

Key words: modeling of a three-winding transformer, power transformer substitution diagram, no-load experience, short-circuit voltage

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.064-072

Введение. Анализ энергоэффективности электрической сети 110 кВ охватывает множество проблем, связанных с потерей мощности при переключениях, низкой загруженностью сети, а также с возникновением ненормальных режимов работы оборудования. Для анализа энергоэффективности сети необходимо учитывать работу нелинейных элементов сети и создавать разные режимы работы. К сожалению, в электроэнергетике все силовое оборудование обслуживается согласно графику по заранее оформленным заявкам, время обслуживания максимально сокращено для проведения конкретной регламентной работы. А проведение каких-либо экспериментов на действующем оборудовании в большинстве случаев вообще запрещено.

Но с развитием компьютерной техники и методов программирования появляются специальные виртуальные математические лаборатории, которые делают возможным создание «виртуального двойника» действующей электроустановки. Так как анализ энергоэффективности электрической сети 110 кВ невозможен без создания нелинейных моделей элементов сети, то предлагается создать нелинейный элемент сети, «виртуальный двойник» силового понижающего трансформатора, затем провести серию экспериментов для анализа точности полученной модели на соответствие паспортным данным реального трансформатора, а также проверить наличие броска тока намагничивания модели трансформатора.

Методы исследования. Рассмотрим трансформатор типа ТДТН-25000/110-У1, основные параметры которого показаны в табл. 1.

Таблица 1. **Основные параметры силового трансформатора ТДТН-25000/110-У1**[1]

Наименование		Значение
Условное обозначение схемы и группы соединения обмоток		Yн/Yн/D-0-11
Номинальная частота, Гц		50
Номинальные мощности обмоток трансформатора, ВА	ВН	25000000
	СН	25000000
	НН	25000000
Устройства регулирования на стороне ВН/СН		РПН/ПБВ
Диапазон регулирования с помощью устройства РПН/ПБВ		± 16 % в ± 9 ступеней / ± 2 х 2,5 %
Номинальные напряжения обмоток трансформатора на основном 10 ответвлении, В	ВН	115000
	СН	38500
	НН	6600
Номинальные токи обмоток трансформатора на основном 10 ответвлении, А	ВН	125,5
	СН	374,9
	НН	2186,9
Потери короткого замыкания при 75С на основном 10 ответвлении пара обмоток ВН-НН, Вт		140000
Потери холостого хода, Вт		25500
Ток холостого хода,%		0,55
Напряжение короткого замыкания на стороне ВН-СН на основном 10 ответвлении,%		10,5
Напряжение короткого замыкания на стороне ВН-НН на основном 10 ответвлении,%		17,5
Напряжение короткого замыкания на стороне СН-НН на основном 3 ответвлении ПБВ,%		6,5
Тип исполнения		Трехобмоточный

Схема трехобмоточного трехфазного понижающего силового трансформатора показана на рис. 1.

Обмотка высокого напряжения (ВН) имеет класс напряжения 110 кВ, собрана в звезду, а ее нейтральный вывод при монтаже трансформатора в нашем случае глухо заземлен. По стороне среднего напряжения в трансформаторе используется вторичная обмотка среднего напряжения (СН), схема которой собрана в звезду, нулевой вывод данной обмотки не заземляется и не зануляется. По стороне низкого напряжения (НН) третичная обмотка собрана в треугольник.

[1] Паспортные данные силового трансформатора ТДТН-25000/110-У1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lider-energo.ru/uploads/oil-trans/transformatori-td-tdts.pdf

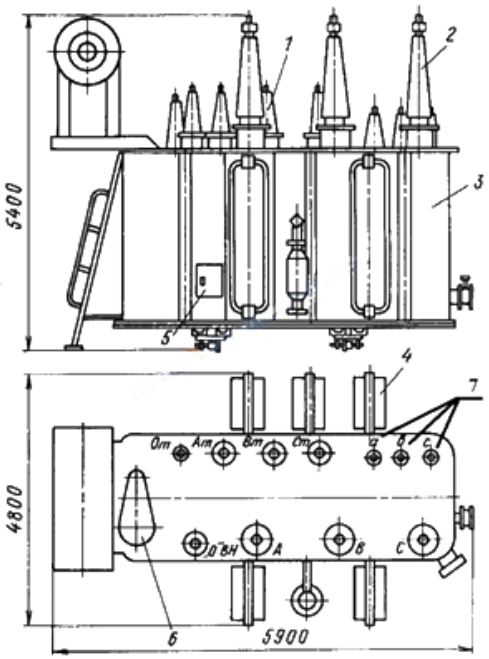


Рис. 1. Основные элементы силового трансформатора: 1 – ввод среднего напряжения (СН) 38500 В; 2 – ввод высокого напряжения (ВН) 115000 В; 3 – бак трансформатора; 4 – система охлаждения; 5 – шкаф автоматического управления дутьем; 6 – переключающее устройство РПН; 7 – ввод низкого напряжения (НН) 6600 В

Расчет параметров схемы замещения силового трансформатора. Схема замещения трехобмоточного трансформатора представляет собой не Т-образную схему, а звезду (рис. 2).

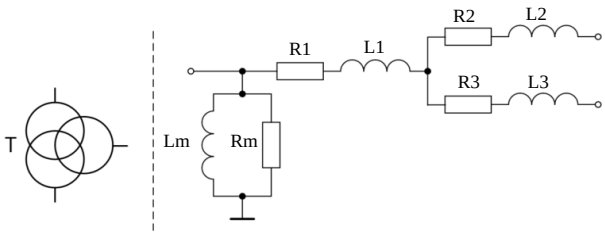


Рис. 2. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Анализ литературы [1–4] показал наличие различных методик расчета схем замещения силового трансформатора, но в научных статьях [5–13] показана непригодность расчета трехобмоточных трансформаторов по Т-образной схеме и необходимость расчета схемы замещения «звезда». В [1] и [10, 7] показан наиболее удобный расчет – не в именованных единицах, а в относительных, приведенных к базисному току.

Согласно паспортным данным, указанным в табл. 1, выполним расчет трансформатора [1].

Определим напряжение короткого замыкания:

$$U_{КВ}\% = 0{,}5(U_{К\ ВН\text{-}СН} + U_{К\ ВН\text{-}НН} - U_{К\ СН\text{-}НН}) = \\ = 0{,}5(10{,}5 + 17{,}5 - 6{,}5) = 10{,}75\ \%; \quad (1)$$

$$U_{КС}\% = 0{,}5(U_{К\ ВН\text{-}СН} + U_{К\ СН\text{-}НН} - U_{К\ ВН\text{-}НН}) = \\ = 0{,}5(10{,}5 + 6{,}5 - 17{,}5) = -0{,}25\ \% \approx 0\ \%; \quad (2)$$

$$U_{КН}\% = 0{,}5(U_{К\ СН\text{-}НН} + U_{К\ ВН\text{-}НН} - U_{К\ ВН\text{-}СН}) = \\ = 0{,}5(6{,}5 + 17{,}5 - 10{,}5) = 6{,}75\ \%; \quad (3)$$

Найдем активное сопротивление обмоток:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{1}{2}\frac{\Delta P_{КЗ}}{S_{ном}} = \\ = \frac{1 \times 140000}{2 \times 25000000} = 0{,}0028. \quad (4)$$

Найдем полное сопротивление обмоток:

$$Z_1 = Z_В = \frac{U_{КВ}\%}{100\%} = \frac{10{,}75}{100} = 0{,}1075; \quad (5)$$

$$Z_2 = Z_С = \frac{U_{КС}\%}{100\%} \approx 0; \quad (6)$$

$$Z_3 = Z_Н = \frac{U_{КН}\%}{100\%} = \frac{6{,}75}{100} = 0{,}0675. \quad (7)$$

Найдем индуктивное сопротивление:

$$X_1 = X_В = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \\ = \sqrt{0{,}1075^2 - 0{,}0028^2} = 0{,}1074; \quad (8)$$

$$X_2 = X_С = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \approx 0; \quad (9)$$

$$X_3 = X_Н = \sqrt{Z_3^2 - R_3^2} = \\ = \sqrt{0{,}0675^2 - 0{,}0028^2} = 0{,}0674. \quad (10)$$

Тогда индуктивность обмоток составит:

$$L_1 = X_1 = 0{,}1074; \quad (11)$$

$$L_2 = X_2 \approx 0; \quad (12)$$

$$L_3 = X_3 = 0{,}0674. \quad (13)$$

Рассчитаем активное сопротивление цепи намагничивания:

$$R_m = \frac{S_{ном}}{\Delta P_{XX}} = \frac{25000000}{25500} = 980{,}4. \quad (14)$$

Рассчитаем индуктивность цепи намагничивания:

$$L_m = \frac{100\ \%}{I_{XX}\%} = \frac{100}{0{,}55} = 181{,}8. \quad (15)$$

Реальный силовой трансформатор при включении на холостой ход вызывает бросок тока, величина броска тока превышает номинальный в 3–4 раза. Это связано с намагничиванием сердечника трансформатора. График характеристики кривой намагничивания показан на рис. 3.

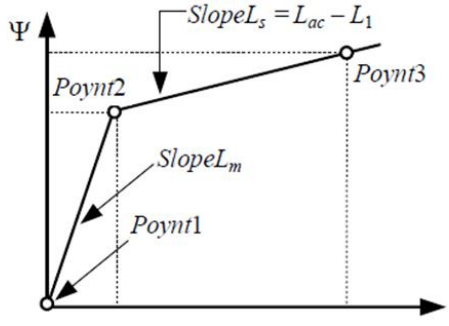


Рис. 3. График характеристики кривой намагничивания: $SlopeL_m$ – прямая намагничивания сердечника трансформатора в линейной области; *Point*2 – точка перегиба характеристики намагничивания сердечника трансформатора, характеризующая начало насыщения; $SlopeL_s$ – прямая характеризующая глубокое насыщение сердечника трансформатора; L_{ac} – индуктивность полного насыщения; L_1 – индуктивность обмотки ВН

Выполним расчет кривой намагничивания сердечника силового трансформатора. Для расчета кривой намагничивания необходимо иметь точные данные о конструкции и материале сердечника. К сожалению, эти данные доступны только заводу-изготовителю. Но анализ источников [10, 14, 15] показал, что точка излома перегиба характеристики намагничивания Ψ_Point2 лежит в пределах от 1,1 до 1,2 о.е. Тогда примем $\Psi_Point2 = 1{,}15$ о.е.

Согласно источникам [10, 7], необходимо ограничить насыщение сердечника трансформатора. Для этого примем дополнительную точку *Point*4.

Рассчитаем координаты точки Point1:

$$I_{Point1} = 0; \quad (16)$$

$$\Psi_{Point1} = 0. \quad (17)$$

Рассчитаем координаты точки *Point*2:

$$I_{Point2} = \frac{\Psi_{Point2} \times I_{XX}}{100} = \frac{1{,}15 \times 0{,}55}{100} = 0{,}00633. \quad (18)$$

Рассчитаем координаты точки *Point*3:

$$I_{Point3} = 1; \quad (19)$$

$$L_{ac} = 2 \times \frac{U_{К\ ВН\text{-}СН}}{100} = 2 \times \frac{10{,}5}{100} = 0{,}21; \quad (20)$$

$$SlopeL_S = L_{ac} - L_1 = 0{,}21 - 0{,}1074 = 0{,}1025; \quad (21)$$

$$\Psi_{Point3} = \Psi_{Point2} + SlopeL_S = \\ = 1{,}15 + 0{,}1025 = 1{,}2525. \quad (22)$$

Рассчитаем координаты точки *Point*4:

$$I_{Point\,4} = 3; \quad (23)$$

$$\Psi_{Point\,4} = 1{,}27. \quad (24)$$

Для выполнения поставленных задач выберем Matlab в библиотеке Simpowersystem, рассмотрим Three-Phase Transformer (Three Windings). Данный элемент моделирует трехфазный трехобмоточный силовой трансформатор и дополнительно может учитывать нелинейность характеристик намагничивания магнитопровода трансформатора.

Заполним настройки элемента TDTN-25000/110 паспортными данными (табл. 1). У параметра Winding1 выбираем схему первичной обмотки звезда с заземленной нейтралью. У параметра Winding2 выбираем схему вторичной обмотки звезда с изолированной нейтралью. У параметра Winding3 выбираем схему третичной обмотки треугольник 11 группы. У параметра Saturable core устанавливаем галочку, благодаря этому наша модель будет иметь нелинейную характеристику намагничивания и создавать бросок тока холостого хода, похожий на реальный трансформатор. Из выпадающего списка выберем ALL measurements (V I Fluxes), это позволит выводить все токи и напряжения трансформатора на мультиметр.

Затем на вкладке Parameters установим расчетные данные из формул (1)–(15), как это показано на рис. 4. В графе Units выбираем pu – относительные единицы. Точки кривой намагничивания задаются в поле Saturation characteristic данными из формул (16)–(24).

Анализ зарубежных источников [16–21] показал, что модель выполнена аналогичным способом. Но отличия заключаются в графике характеристики кривой намагничивания (рис. 3), а именно в задании 4-й точки. В учебных целях прямой участок характеристики между точками *Point*3 и *Point*4 выполнен под небольшим углом относительно оси *i*, что означает насыщение магнитопровода. В дальнейшем, имея реальную осциллограмму, можно откорректировать наклон кривой между *Point*3 и *Point*4, добившись идеального результата.

Для анализа точности расчетов необходимо выполнить обязательные приемосдаточные испытания: опыт холостого хода и опыт короткого замыкания.

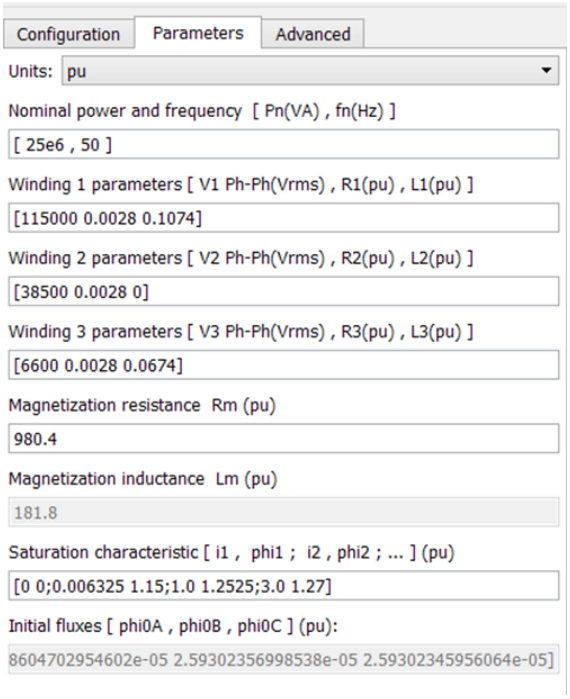


Рис. 4. Параметры настройки элемента TDTN-25000/110 (вкладка Parameters)

Результаты исследования. *Виртуальный опыт холостого хода (XX)*. Принцип опыта XX заключается в подключении трансформатора к источнику номинального напряжения с разомкнутыми вторичными обмотками. В процессе проведения опыта получают мощность холостого хода *P*xx, ток холостого хода *I*xx, номинальные напряжения и т.д. [3, 4].

Опыт проведен по схеме двух ваттметров. Для этого создана виртуальная схема испытания силового трансформатора, выполнена настройка решателя, выставлены необходимые значения во вкладке настроек [1, 22], решатель ode23tb. Благодаря этому решателю, графики, построенные осциллографом, получаются без разрывов и «артефактов» (точность выбираем 1e-7, максимальный шаг выбираем 0,0005 – данные параметры можно менять для достижения необходимой точности моделирования).

Важно во всех элементах модели настроить частоту сети 50 Гц, так как по умолчанию установлено 60 Гц.

Модель виртуального опыта холостого хода силового трансформатора показана на рис. 5. Она состоит из источника трехфазного напряжения, выключателя, измерительных трансформаторов тока и напряжения, силового трансформатора, мультиметра, осциллографа и дисплеев.

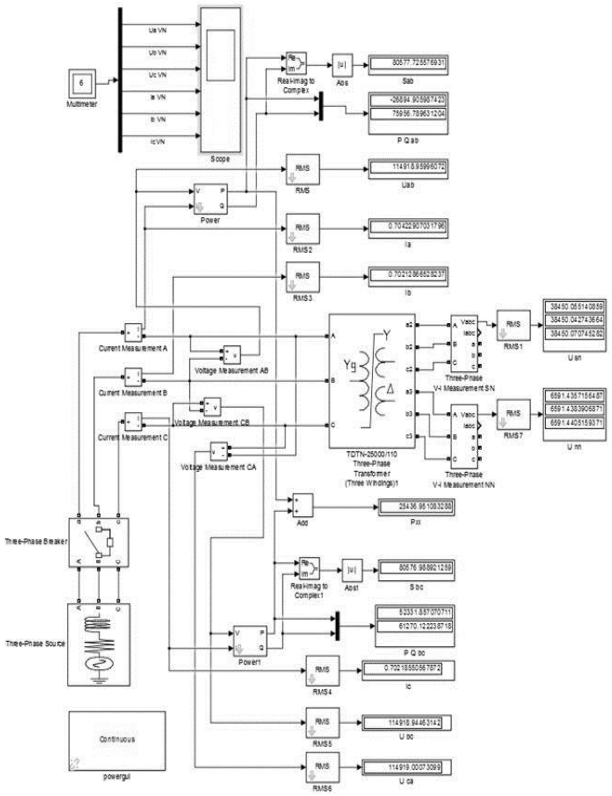


Рис. 5. Модель виртуального опыта холостого хода силового трансформатора

Время симуляции опыта холостого хода – 30 секунд. Все показания дисплеев приборов сведены в таблицу значений опыта холостого хода (табл. 2).

Таблица 2. **Показания дисплеев приборов опыта холостого хода силового трансформатора**

Обозначение прибора	Измеренная величина	Единицы измерения
U ab	114918	В
I a	0,70	А
I b	0,70	А
U sn	38450/38450/38450	В
U nn	6591/6591/6591	В
P xx	25436	Вт
I c	0.70	А
U bc	114918	В
U ca	114919	В

Данные анализа погрешности виртуальной модели сведены в табл. 3.

Таблица 3. **Погрешности опыта холостого хода силового трансформатора**

Параметр	Паспортное значение	Опыт XX	Погрешность
P xx	25500 Вт	25436 Вт	0,25 %
I xx	0,55%	0,7А или 0,55772 %	–1,4 %

Модель силового трансформатора показывает высокую точность при проведении опыта холостого хода.

Осциллограммы, записанные с помощью осциллографа, подключенного к мультиметру, показывают, что реальный силовой трансформатор при включении создает бросок тока, который многократно превышает максимальный рабочий ток. Это связано с тем, что идет процесс насыщения магнитопровода трансформатора. Также процесс намагничивания сердечника трансформатора искажает форму синусоиды. Необходимо проверить, выполняет ли наш виртуальный двойник силового трансформатора условия наличия броска тока, а так же искажение формы кривой синусоиды напряжения (осциллограммы показаны на рис. 6).

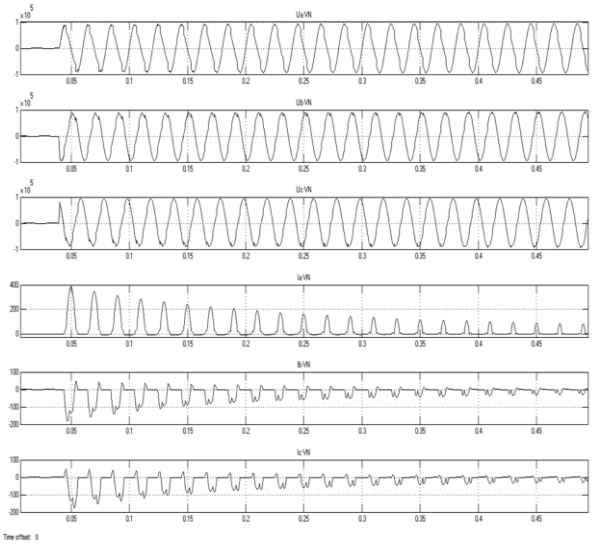


Рис. 6. Осциллограммы опыта холостого хода силового трансформатора

Модель ведет себя как реальный трансформатор. Согласно приведенным осциллограммам, четко просматривается переходный процесс, который становится незначительным на первой секунде, но полностью заканчивается на третьей секунде (2,5 с) моделирования. Бросок тока намагничивания достигает 385 А, что в 3 раза больше максимального рабочего тока $I_{ВН}$ = 125,5 А. Также на осциллограммах видно искажение формы синусоиды напряжения (Ua, Ub, Uc), как показано на рис. 6.

Виртуальные опыты короткого замыкания. Перед опытом короткого замыкания закорачивают вторичную обмотку, затем увеличивают напряжение на первичной обмотке до такого уровня, при котором ток

на закороченной обмотке будет равен максимальному рабочему току. При проведении реальных испытаний закорачивают обмотку высокого напряжения, а питание подают со стороны низкого напряжения. Это связано с мерами безопасности при проведении данных опытов, а также с технической сложностью плавного регулирования высокого напряжения (115000 В) [3, 4].

Так как ТДТН-25000/110-У1 является трехобмоточным силовым трансформатором, необходимо выполнить 3 опыта короткого замыкания:

1 опыт – КЗ ВН-СН. Закорачивается обмотка среднего напряжения. Обмотка низкого напряжения остается разомкнутой.

2 опыт – КЗ ВН-НН. Закорачивается обмотка низкого напряжения. Обмотка среднего напряжения остается разомкнутой.

3 опыт – КЗ СН-НН. Закорачивается обмотка низкого напряжения. Обмотка высокого напряжения остается разомкнутой. Напряжение подают на обмотку среднего напряжения.

Виртуальная модель опыта короткого замыкания ВН-СН. Если разобрать схему, то на источнике напряжения будет 26800В. При собранной схеме и включенном выключателе линейное напряжение достигнет всего $U_{\text{КЗ ВН-СН}}$ = 12339 В, а ток на обмотке среднего напряжения – своего номинального значения (374 А).

Виртуальная модель опыта короткого замыкания ВН-НН. Если разобрать схему, то на источнике напряжения будет 34580 В. При собранной схеме и включенном выключателе линейное напряжение достигнет всего $U_{\text{КЗ ВН-НН}}$ = 20109 В, а ток на обмотке низкого напряжения – своего номинального значения (2186 А).

Виртуальная модель опыта короткого замыкания СН-НН. Если разобрать схему, то на источнике напряжения будет 45975 В. При собранной схеме и включенном выключателе линейное напряжение достигнет всего $U_{\text{КЗ СН-НН}}$ = 2602 В, а ток на обмотке низкого напряжения – своего номинального значения (2186 А).

Для анализа точности виртуальной модели силового трансформатора сведем все данные опытов короткого замыкания в табл. 4.

Модель силового трансформатора показывает высокую точность при проведении опытов короткого замыкания.

Таблица 4. **Погрешности опыта короткого замыкания силового трансформатора**

Параметр	Паспортное значение	Опыт КЗ	Погрешность
P кз ВН-СН	140000 Вт	139354 Вт	0,46 %
U кз ВН-СН	10,5 %	12339 В или 10,7296 %	–2,18 %
P кз ВН-НН	140000 Вт	140061 Вт	–0,04 %
U кз ВН-НН	17,5 %	20109 В или 17,48 %	0,08 %
P кз СН-НН	140000 Вт	140076 Вт	–0,05 %
U кз СН-НН	6,5 %	2602 В или 6,75 %	–3,97 %

Выводы. Задача достигнута, получена нелинейная модель силового трансформатора ТРДН-25000/110. Проведенная серия экспериментов доказывает точность выполнения модели трансформатора в соответствии с паспортными данными реального трансформатора. Данная модель трансформатора позволит исследовать переходные процессы в сети 110 кВ, что сделает анализ энергоэффективности электрической сети 110 кВ более подробным.

Список литературы

1. **Костюченко Л.П.** Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие. – Красноярск, 2012. – 215 с.

2. **Ананичева С.С., Мызин А.Л.** Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учеб. пособие. – 6-е изд., испр. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 80 с.

3. **Controlling** the oil rectification process in a primary oil refining unit using a dynamic model / A.V. Zatonskiy, L.G. Tugashova, N.N. Alaeva, K.L. Gorshkova // Petroleum Chemistry. – 2017. – Т. 57, № 12. – С. 1121–1131.

4. **Давыдкин М.Н., Басков С.Н.** Лабораторный практикум «Электротехника и электроника». – Новотроицк: НФ НИТУ «МИ-СиС», 2013. – 164 с.

5. **Герасимук А.В., Семыкина И.Ю., Кипервассер М.В.** Расчет параметров схемы замещения трансформаторов с расщепленной обмоткой с учетом устройства регулирования напряжения под нагрузкой в обмотке высшего напряжения // Горное оборудование и электротехника. – 2019. – № 2. – С. 52–59.

6. **Евдокунин Г., Дмитриев М.** Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы // Новости электротехники. – 2008. – № 5(53). – С. 2–7.

7. **Дед А.В.** Расчет параметров simulink-модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов // Омский научный вестник. – 2017. – № 3(153). – С. 68–74.

8. **Мартынов В.А., Голубев А.Н., Евдаков А.Е.** Анализ динамических режимов работы трехфазных трехстержневых трансформаторов в пакете MATLAB // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 4. – С. 11–18.

9. **Разработка** модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора / И.С. Снитько, А.И. Тихонов, А.В. Ступов, В.Е. Мизонов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47–56.

10. **Новаш И.В., Румянцев Ю.В.** Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12–24.

11. **Ягуп В.Г.**, **Ягуп Е.В.** К определению параметров моделей трансформаторов // Светотехника и электроэнергетика. – 2014. – № 2. – С. 52–64.

12. **Кралин А.А., Тюриков М.П.** Моделирование трехстержневого трансформатора в simulin // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 3(110). – С. 238–242.

13. **Копотева А.В., Затонский А.В.** Математическая модель выбора ресурсосберегающих мероприятий на промышленном предприятии в условиях риска // Управление финансовыми рисками. – 2017. – № 1. – С. 60–70.

14. **EMTDC:** Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation. User's Guide V4.3.1. – Manitoba HVDC Research Centre, 2010. – 233 p.

15. **Kahrobaee S., Algrain M. C., Asgarpoor S**. Investigation and Mitigation of Transformer Inrush Current During Black Start of an Independent Power Producer Plant // Energy and Power Engineering. – 2013. – No. 5. – P. 1–7.

16. **Wiwit Kastawan, Erwin Yusuf, Afif Fadhilah.** Design of Phase-Shifting Transformer Based on Simulink Matlab Simulation // International journal of applied technology research. – 2020. – Vol. 1, No. 2. – P. 153–168.

17. **Romanyuk F.**, **Novash I., Rumiantsev Y., Węgierek P.** Wye-connected current transformers simplified model validation in MATLAB-Simulink // Przegląd elektrotechniczny. – 2015. – R. 91, No. 11. – P. 292–295.

18. **Sánchez-Martos C., Gómez-González M., Jurado F.** Simulation of Magnetizing Inrush Current of Three-Phase Three-Legged Transformers by Direct Measurement of Coils Inductance // RE&PQJ. – March, 2013. – Vol.1, No.11. – P. 326–329.

19**. Experimental** simulation analysis for single phase transformer tests / Ali N. Hamoodi, Bashar A. Hammad, Fawaz S. Abdullah // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – June, 2020. – Vol. 9, No. 3. – P. 862–869.

20. **Conversion** of RMS into Instantaneous Transformer Saturation Characteristics – Implementation in MATLAB/SPS-ST / Amir Tokić, Viktor Milardić, Mensur Kasumović, Damir Demirović // International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.). – September–October, 2019. – Vol. 14, No. 5.

21. **Linnik K.S., Neyman L.A.** Numerical simulation of electromagnetic processes in power transformers taking into account the nonlinearities of magnetic bonds // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. J. Phys.: Conf. Ser. 2032 012091.

22. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

References

1. Kostyuchenko, L.P. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem elektrosnabzheniya v programme MATLAB* [Simulation modeling of power supply systems in the MATLAB program]. Krasnoyarsk, 2012. 215 p.

2. Ananicheva, S.S., Myzin, A.L. *Skhemy zameshcheniya i ustanovivshiesya rezhimy elektricheskikh setey* [Equivalent schemes and steady-state modes of electrical networks]. Ekaterinburg: UrFU, 2012. 80 p.

3. Zatonskiy, A.V., Tugashova, L.G., Alaeva, N.N., Gorshkova, K.L. Controlling the oil rectification process in a primary oil refining unit using a dynamic model. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 12, pp. 1121–1131.

4. Davydkin, M.N., Baskov, S.N. *Laboratornyy praktikum «Elektrotekhnika i elektronika»* [Laboratory workshop "Electrical engineering and electronics"]. Novotroitsk: NF NITU «MI-SiS», 2013. 164 p.

5. Gerasimuk, A.V., Semykina, I.Yu., Kipervasser, M.V. Raschet parametrov skhemy zameshcheniya transformatorov s rasshcheplennoy obmotkoy s uchetom ustroystva regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoy v obmotke vysshego napryazheniya [Calculation of the parameters of the equivalent circuit of transformers with a split winding considering the voltage regulation device under load of the higher voltage winding]. *Gornoe oborudovanie i elektrotekhnika*, 2019, no. 2, pp. 52–59.

6. Evdokunin, G., Dmitriev, M. Transformatory v elektricheskoy seti. Modelirovanie perekhodnykh protsessov s uchetom konfiguratsii magnitnoy sistemy [Transformers in the electrical network. Modeling of transient processes considering the configuration of the magnetic system]. *Novosti elektrotekhniki*, 2008, no. 5(53), pp. 2–7.

7. Ded, A.V. Raschet parametrov simulink-modeli silovogo trekhfaznogo transformatora dlya

issledovaniya dlitel'nykh nesimmetrichnykh rezhimov [Calculation of the parameters of a simulink model of a power three-phase transformer to study long-term asymmetric modes]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2017, no. 3(153), pp. 68–74.

8. Martynov, V.A., Golubev, A.N., Evdakov, A.E. Analiz dinamicheskikh rezhimov raboty trekhfaznykh trekhsterzhnevykh transformatorov v pakete MATLAB [Analysis of the dynamic modes of operation of three-phase three-rod transformers in the MATLAB package]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 4, pp. 11–18.

9. Snit'ko, I.S., Tikhonov, A.I., Stupov, A.V., Mizonov, V.E. Razrabotka modeli perekhodnykh rezhimov s uchetom vzaimnoy induktivnosti poley rasseyaniya dlya realizatsii tsifrovogo dvoynika transformatora [Development of model of transient modes considering the mutual inductance of stray fields for the implementation of a digital twin of a transformer]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 4, pp. 47–56.

10. Novash, I.V., Rumyantsev, Yu.V. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki MatLab-Simulink s uchetom nasyshcheniya magnitoprovoda [Calculation of the parameters of a three-phase transformer model from the MatLab-Simulink library considering the saturation of the magnetic circuit]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2015, no. 1, pp. 12–24.

11. Yagup, V.G., Yagup, E.V. K opredeleniyu parametrov modeley transformatorov [On determination of parameters of transformer models]. *Svetotekhnika i elektroenergetika*, 2014, no. 2, pp. 52–64.

12. Kralin, A.A., Tyurikov, M.P. Modelirovanie trekhsterzhnevogo transformatora v simulin [Modeling a three-rod transformer in simulink]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2015, no. 3(110), pp. 238–242.

13. Kopoteva, A.V., Zatonskiy, A.V. Matematicheskaya model' vybora resursosberegayushchikh meropriyatiy na promyshlennom predpriyatii v usloviyakh riska [Mathematical model to choose resource-saving measures at an industrial enterprise under risk conditions]. *Upravlenie finansovymi riskami*, 2017, no. 1, pp. 60–70.

14. EMTDC: Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation. User's Guide V4.3.1. Manitoba HVDC Research Centre, 2010. 233 p.

15. Kahrobaee, S., Algrain, M.C., Asgarpoor, S. Investigation and Mitigation of Transformer Inrush Current During Black Start of an Independent Power Producer Plant. *Energy and Power Engineering*, 2013, no. 5, pp. 1–7.

16. Kastawan, W., Yusuf, E., Fadhilah, A. Design of Phase-Shifting Transformer Based on Simulink Matlab Simulation. *International journal of applied technology research*, 2020, vol. 1, no. 2, pp. 153–168.

17. Romanyuk, F., Novash, I., Rumiantsev, Y., Węgierek, P. Wye-connected current transformers simplified model validation in MATLAB-Simulink. *Przegląd elektrotechniczny*, 2015, vol. 91, no. 11, pp. 292–295.

18. Sánchez-Martos, C., Gómez-González, M., Jurado, F. Simulation of Magnetizing Inrush Current of Three-Phase Three-Legged Transformers by Direct Measurement of Coils Inductance. RE&PQJ, March 2013, vol. 1, no. 11, pp. 326–329.

19. Hamoodi, Ali N., Hammad, Bashar A., Abdullah, Fawaz S. Experimental simulation analysis for single phase transformer tests. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, June 2020, vol. 9, no. 3, pp. 862–869.

20. Tokić, A., Milardić, V., Kasumović, M., Demirović, D. Conversion of RMS into Instantaneous Transformer Saturation Characteristics – Implementation in MATLAB/SPS-ST. *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, September–October 2019, vol. 14, no. 5.

21. Linnik, K.S., Neyman, L.A. Numerical simulation of electromagnetic processes in power transformers taking into account the nonlinearities of magnetic bonds. Journal of Physics: Conference Series, 2021. J. Phys.: Conf. Ser. 2032 012091.

22. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 4

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 29.07.2022. Выход в свет 31.08.2022. Формат 60x84 $^1/_8$.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 9,21. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции и издательства: Ивановский государственный энергетический университет, 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто», 153025, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Дзержинского