



Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2023 / Вып. 1

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. Ключина, 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
Технический редактор
Редактор

С.В. Ключина
Н.В. Королева
С.М. Коткова

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

А.С. Зиновьева, С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков. Методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок.....**5**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Д.В. Коробков. Методика и результаты анализа качества выходной энергии автономных систем электроснабжения переменного напряжения с модульными статическими преобразователями в установившемся режиме.... **11**

Д.Ю. Вихарев, Е.А. Воробьева, Д.И. Ганджаев, А.С. Лифшиц, А.Ю. Мурзин, Н.А. Родин. Эквивалентирование участков электроэнергетических систем на основе режимных параметров в узлах эквивалентирования....**25**

А.А. Яблоков, П.А. Кабаков, Е.Е. Готовкина, А.В. Панащатенко. Разработка и исследование катушки Роговского для работы в условиях эксплуатации открытого распределительного устройства.....**31**

А.А. Николаев, М.Ю. Афанасьев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станков с использованием преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров....**41**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

А.Н. Голубев. Синхронный многофазный электропривод с управлением по основному энергетическому каналу.....**53**

И.С. Полющеников. Модельно-ориентированное программирование как инструмент инженера-электромеханика.....**60**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.П. Жуков, И.А. Кокулин, В.Н. Виноградов. Моделирование и расчет процесса теплообмена в многоступенчатых многопоточных испарителях мгновенного вскипания.....**71**

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 научным специальностям: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы; 2.4.3. Электроэнергетика; 2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

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).



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

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2023 / Issue 1

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

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovskiy, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor)
I.K. Muravyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
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, Doctor 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
Technical Editor
Editor

S.V. Klyunina
N.V. Koroleva
S.M. Kotkova

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

A.S. Zinovieva, S.D. Gorshenin, G.V. Ledukhovskiy, V.P. Zhukov. Method of simultaneous equations of material and energy balances when calculating actual data of thermal efficiency of gas turbine plants.....**5**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

D.V. Korobkov. Methodology and results of analysis of output energy quality of autonomous AC power supply systems with modular static converters in steady-state mode..... **11**

D.Yu. Vikharev, E.A. Vorobyova, D.I. Gandzhaev, A.S. Lifshits, A.Yu. Murzin, N.A. Rodin. Equivalence of sections of electric power systems based on operating parameters in equivalence nodes.....**25**

A.A. Yablokov, P.A. Kabakov, E.E. Gotovkina, A.V. Panaschatenko. Development and research of Rogowski coil to operate under operating conditions of open switchgear.....**31**

A.A. Nikolaev, M.Yu. Afanasyev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov. Improvement of power quality in power supply systems of rolling mills using frequency converters with active rectifiers due to use of specialized passive filters.....**41**

ELECTROMECHANICS

A.N. Golubev. Synchronous multiphase electric drive with main control power channel.....**53**

I.S. Polyuschenkov. Model-based programming
as a technique of electromechanical engineer....**60**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

V.P. Zhukov, I.A. Kokulin, V.N. Vinogradov.
Modeling and Calculation of Heat and Mass Transfer
Process in Multistage Multiflow Flash
Evaporators....**71**

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: 2.3.3. Automation and control of technological processes and productions; 2.3.7. Computer modeling and design automation; 2.4.2. Electrotechnical complexes and systems; 2.4.3. Power industry; 2.4.5. Energy systems and complexes; 2.4.6. Theoretical and applied heat engineering; 2.6.13. Processes and apparatuses of chemical technologies.

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.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Анастасия Сергеевна Зиновьева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: lucky-istorik@yandex.ru

Сергей Дмитриевич Горшенин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Григорий Васильевич Ледуховский

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, ректор, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Сведение материального и энергетического балансов по данным, получаемым от систем технического и коммерческого учета, является обязательным этапом расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. При этом для газотурбинных установок методика сведения балансов нормативными документами не регламентирована, соответствующие подходы к решению рассматриваемой задачи не проработаны. Отсутствуют данные о влиянии процедуры сведения балансов на результаты расчета фактических значений КПД брутто газотурбинных установок. В связи с этим актуальным является разработка методики совместного сведения материального и энергетического балансов газотурбинных установок.

Материалы и методы. Задача совместного сведения материального и энергетического балансов газотурбинной установки в скалярной постановке сформулирована в рамках концепции решения некорректных задач на основе регуляризации Тихонова, позволяющей получить аналитическое решение. При проведении практических расчетов использованы данные АСУ ТП эксплуатируемой газотурбинной установки GTX-100.

Результаты. Предложена методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок. Показано влияние процедуры сведения балансов на результаты расчета фактических значений показателей тепловой экономичности газотурбинной установки. На примере газотурбинной установки GTX-100 определены предельные отклонения фактических значений КПД брутто при корректировке результатов измерения контролируемых параметров в ходе сведения балансов.

Выводы. Разработанная методика позволяет учитывать предельно допустимую суммарную невязку балансов по массе и энергии, а также максимальное отклонение скорректированных по результатам балансировки значений параметров от их исходных значений, обусловленное нормируемыми метрологическими характеристиками средств измерения.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, газотурбинная установка, тепловая экономичность оборудования, материальный баланс, энергетический баланс, некорректная задача, метод регуляризации

Anastasia Sergeevna Zinovieva

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lucky-istorik@yandex.ru

Sergei Dmitrievich Gorshenin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Grigory Vasilievich Ledukhovskiy

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Rector, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Method of simultaneous equations of material and energy balances when calculating actual data of thermal efficiency of gas turbine plants

Abstract

Background. Reconciliation of material and energy balances according to data received from systems of technical and commercial record keeping is a mandatory step to calculate thermal efficiency indicators of thermal power plant (TPP) equipment. At the same time, the methodology to draw the balance is not regulated by regulatory documents for gas turbine plants. Appropriate approaches to solve the issue under consideration have not been worked out. There is no data on the impact of the balancing on the results of calculating the actual values of the gross efficiency of gas turbine plants. Thus, it is relevant to develop a methodology of simultaneous equations of the material and energy balances of gas turbine plants.

Materials and methods. The problem of simultaneous equations of the material and energy balances of a gas turbine plant in a scalar value is formulated within the framework of the concept of solving ill-posed problems based on Tikhonov's regularization. The concept allows one to obtain an analytical solution. When conducting calculations, data from the automated process control system of the operated GTX-100 gas turbine plant have been used.

Results. The method of simultaneous equations of the material and energy balances when calculating the actual indicators of the thermal efficiency of gas turbine plants is proposed. The influence of the balancing procedure on the results of calculating the actual values of the thermal efficiency indicators of a gas turbine plant is shown. The authors have determined the maximum deviations of the actual gross efficiency values when adjusting the results of measuring the controlled parameters using the example of GTX-100 gas turbine plant.

Conclusions. The developed technique makes it possible to consider the maximum allowable total discrepancy between mass and energy balances, as well as the maximum deviation of the parameter values adjusted according to the balancing results, due to the standardized metrological characteristics of measuring instruments.

Key words: thermal power plant, gas turbine plant, thermal efficiency of equipment, material balance, energy balance, ill-posed problem, regularization method

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.005-010

Введение. Этап сведения материальных и энергетических балансов по данным, получаемым от систем коммерческого и технического учета показателей работы оборудования, является обязательным в соответствии с требованиями нормативных документов¹ и предшествует собственно расчету фактических (а затем и номинальных) значений показателей тепловой экономичности агрегатов и установок

¹ РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: разработано АО «Фирма ОРГРЭС»; СО 153-34.09.110. Руководящие указания по ведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: разработано ОРГРЭС.

ТЭС. При этом в нормативных документах отсутствуют требования к ведению балансов по газотурбинным установкам (ГТУ), имеющим очевидные технологические отличия от традиционных паросиловых установок. Так, в уравнениях материального и энергетического балансов ГТУ, в отличие от паросиловых установок, фигурируют показатели не одного (воды в жидком и газообразном агрегатных состояниях), а трех теплоносителей: воздуха, топлива (природного газа) и продуктов его сгорания:

$$B_{\text{КС}} + G_{1\text{к}} - G_{2\text{т}} = 0; \quad (1)$$

$$Q_{\text{КС}} + Q_{1\text{к}} - Q_{2\text{т}} - Q_5 - Q_{\text{эм}} - N_{\text{ГТУ}} = 0, \quad (2)$$

где $B_{\text{КС}}$, $G_{1\text{к}}$ и $G_{2\text{т}}$ – расходы топлива в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор и про-

дуктов сгорания на выходе из турбины соответственно, кг/с; Q_{KC} – тепловая мощность, подведенная к камере сгорания, МВт; $Q_{1к}$ – тепловая мощность, подведенная с потоком воздуха к компрессору ГТУ, МВт; $Q_{2т}$ – тепловая мощность потока продуктов сгорания на выходе из ГТУ, МВт; Q_5 – мощность тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ, МВт; $Q_{эм}$ – мощность электромеханических потерь ГТУ, МВт; $N_{ГТУ}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт.

При сведении балансов по данным, получаемым от систем коммерческого и технического учета, балансы (1) и (2) в общем случае не сводятся ввиду метрологического несовершенства приборов учета или их неисправности:

$$B_{KC}^и + G_{1к}^и - G_{2т}^и = \Delta G; \quad (3)$$

$$Q_{KC}^и + Q_{1к}^и - Q_{2т}^и - Q_5 - Q_{эм} - N_{ГТУ}^и = \Delta E, \quad (4)$$

где индекс «и» указывает на измеренное значение показателя, получаемое от систем учета как результат прямого или косвенного измерения; ΔG – невязка материального баланса, кг/с; ΔE – невязка энергетического баланса, МВт.

Составляющая Q_5 определяется по результатам экспертной оценки в ходе поверочного теплового расчета либо по показателям работы системы вентиляции укрытия ГТУ. Составляющая $Q_{эм}$ рассчитывается на основании функциональной зависимости электромеханического КПД ГТУ от ее электрической мощности, которая входит в состав комплекта энергетических характеристик ГТУ [1].

Прочие составляющие Q_i уравнения (4) связаны со слагаемыми уравнения (3) через соответствующие термодинамические функции состояния и удельные тепловые характеристики теплоносителей:

$$Q_{KC}^и = B_{KC}^и (h_{топл}^и + Q_{н}^р); \quad (5)$$

$$Q_{1к}^и = G_{1к}^и h_{1к}^и; \quad (6)$$

$$Q_{2т}^и = G_{2т}^и h_{2т}^и, \quad (7)$$

где $h_{топл}^и$, $h_{1к}^и$, $h_{2т}^и$ – энтальпия топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной соответственно, определяемые по измеренным значениям параметров теплоносителей, МДж/кг; $Q_{н}^р$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, принимаемая по данным коммерческого учета, МДж/кг.

Указанные энтальпии теплоносителей зависят от состава теплоносителей (смеси газов) и их параметров.

При сведении балансов (3) и (4) измеренные значения показателей должны быть скорректированы таким образом, чтобы невязки балансов ΔG , ΔE были равны нулю.

Методы исследования. Ранее нами было предложено решение задачи совместного сведе-

ния материальных и энергетических балансов применительно к оборудованию паросилового цикла [2]. В данном случае апробированный подход распространяется на другой объект – ГТУ, имеющий существенные технологические особенности. Предлагается проведение процедуры сведения балансов на основе концепции регуляризации Тихонова [3–7], которая позволяет исходную некорректную задачу (1)–(2) свести к виду

$$A\mathbf{Y} + \sigma = \mathbf{B}, \quad (8)$$

а затем при скалярной постановке [3] – к задаче минимизации следующей функции:

$$F(\mathbf{Y}, \lambda) = |A\mathbf{Y} - \mathbf{B}|^2 + \lambda |\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0|^2 \Rightarrow \min, \quad (9)$$

где \mathbf{Y} , \mathbf{Y}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка; \mathbf{A} , \mathbf{B} – известные операторы модели системы; σ – числовой параметр, характеризующий погрешность правой части уравнения; λ – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать определенным способом.

При минимизации функции $F(\mathbf{Y})$ получается регуляризованное решение $\mathbf{Y}(\lambda)$, зависящее от параметра λ . Первое слагаемое в целевой функции (9) показывает суммарную невязку балансов $\Delta = |A\mathbf{Y}|$, а второе слагаемое характеризует модуль вектора отклонения полученного решения от исходного вектора: $\Delta\mathbf{Y} = |\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0|$.

Матричный оператор \mathbf{A} и искомое регуляризованное решение \mathbf{Y} с учетом (3)–(7) можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_{топл}^и + Q_{н}^р & h_{1к}^и & -h_{2т}^и & -\frac{1}{\eta_{5т}} \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{Y} = (B_{KC} \quad G_{1к} \quad G_{2т} \quad N_{ГТУ})^T, \quad (11)$$

где $\eta_{5т}$ характеризует тепловые потери от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханические потери ГТУ и определяется из (4) согласно равенству

$$Q_5 + Q_{эм} + N_{ГТУ} = \frac{N_{ГТУ}}{\eta_{5т}};$$

индекс «Т» указывает на транспонирование матрицы.

Аналитическое решение задачи (9) может быть получено при ее скалярной постановке (решение известно [3]) (при $\mathbf{B} = 0$):

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{E})^{-1} \lambda \mathbf{Y}_0. \quad (12)$$

Результаты исследования. В качестве исходных данных для расчета по разработанной методике использовались значения показателей работы ГТУ типа GTX-100, принятые по данным АСУ ТП ТЭС для одного из режимов (назовем его контрольным режимом), как результаты прямых или косвенных измерений (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные для расчета контрольного режима

Наименование параметра, обозначение, единица измерения	Значение
Расход топлива в камеру сгорания $B_{КС}^i$, кг/с	1,79
Расход воздуха на входе в компрессор $G_{1к}^i$, кг/с	101,46
Расход продуктов сгорания на выходе из турбины $G_{2т}^i$, кг/с	99,54
Электрическая мощность ГТУ $N_{ГТУ}^i$, МВт	29,23
Энтальпия топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ $h_{топл}^i$, МДж/кг	0,11509
Низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива $Q_{н}^p$, МДж/кг	50,535
Энтальпия воздуха на входе в компрессор $h_{1к}^i$, МДж/кг	0,002692
Энтальпия продуктов сгорания за турбиной $h_{2т}^i$, МДж/кг	0,60243
Коэффициент потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь $\eta_{5т}$, ед.	0,9414

Результаты расчетов для контрольного режима представлены на рис. 1–3.

Зависимости целевой функции оптимизации (9) и ее слагаемых от параметра регуляризации λ представлены на рис. 1. Зависимость целевой функции от параметра регуляризации $F(\lambda)$ имеет четко выраженный минимум при значении параметра регуляризации $\lambda^* = 0,95$.

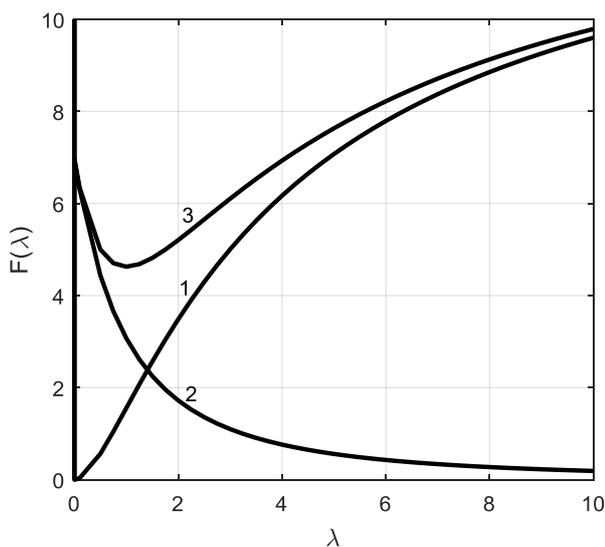


Рис. 1. Зависимость целевой функции оптимизации $F(\lambda)$ и ее слагаемых от параметра регуляризации λ : 1 – первое слагаемое целевой функции оптимизации (сумма квадратов небалансов по массе и энергии); 2 – второе слагаемое целевой функции оптимизации (квадрат модуля вектора отклонений $\sum(Y - Y_0)^2$); 3 – целевая функция оптимизации

Представленные на рис. 2 зависимости отношения регуляризованных и исходных значений расходов теплоносителей и электрической мощности ГТУ от параметра регуляризации λ дают возможность провести количественную оценку параметрической чувствительности модели. Здесь допустимые максимальные отклонения значений параметров ре-

гуляризации, оцененные в $\pm 1\%$, приняты на основании анализа метрологических характеристик исправных поверенных средств измерения, показания которых использованы в качестве исходных данных для расчета контрольного режима.

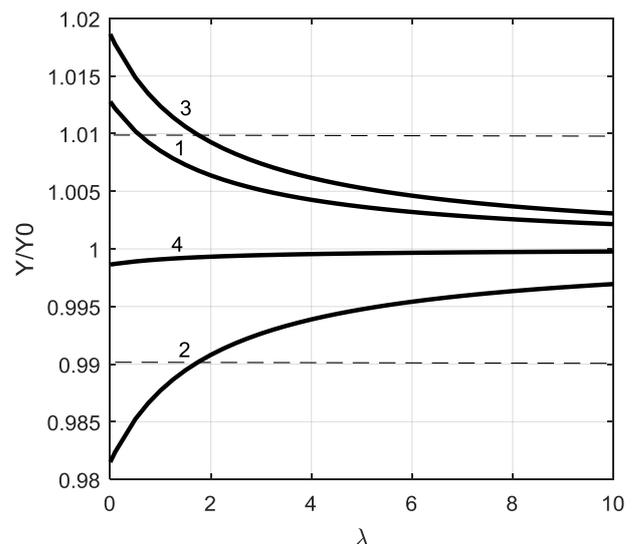


Рис. 2. Зависимости отношения регуляризованных Y и исходных Y_0 значений расходов теплоносителей и электрической мощности ГТУ от параметра регуляризации λ : 1 – по расходу топлива в камеру сгорания $B_{КС}$; 2 – по расходу воздуха на входе в компрессор $G_{1к}$; 3 – по расходу продуктов сгорания на выходе из турбины $G_{2т}$; 4 – по электрической мощности ГТУ $N_{ГТУ}$; штриховые линии – допустимые максимальные отклонения значений параметров при регуляризации

Более детально результаты расчетов по регуляризации параметров для контрольного режима представлены в табл. 2, где приведены исходные априорные значения параметров и их значения после регуляризации при разных значениях параметра регуляризации λ .

Таблица 2. Результаты расчета для контрольного режима

Обозначение, единица измерения	Априорные значения Y_0	Регуляризованные значения Y				
		$\lambda = 0,0001$	$\lambda = 0,1$	$\lambda^* = 0,95$	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$
$B_{КС}$, кг/с	1,79	1,81	1,81	1,81	1,81	1,80
$G_{1к}$, кг/с	101,46	99,58	99,67	100,19	100,21	100,53
$G_{2т}$, кг/с	99,54	101,40	101,31	100,79	100,77	100,46
$N_{ГТУ}$, МВт	29,23	29,19	29,19	29,20	29,20	29,21
ΔG , кг/с	3,7100	0,0002	0,1787	1,2047	1,2468	1,8664
ΔE , МВт	-0,0786	-0,0000	-0,0036	-0,0241	0,0249	-0,0373
$F(\lambda)$	13,7703	6,9689	6,3462	4,6201	4,6275	5,2059

На рис. 3 приведены зависимости относительных небалансов массы и энергии от параметра регуляризации λ . Здесь допустимые максимальные отклонения $\pm 0,5\%$ приняты по аналогии с требованиями нормативных документов, предъявляемыми к максимально допустимому рассогласованию КПД брутто по прямому и обратному балансам для паровых котлов (поскольку аналогичные требования применительно к газотурбинным установкам нормативными документами не зафиксированы).

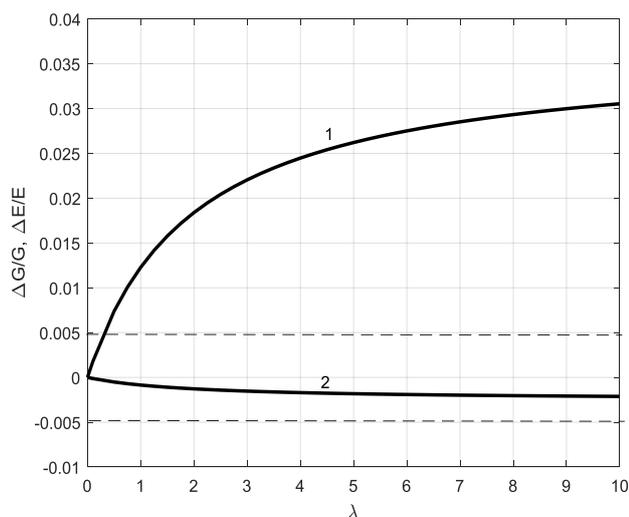


Рис. 3. Зависимости относительного небаланса массы (1) и энергии (2) от параметра регуляризации λ : штриховые линии – допустимые максимальные отклонения при сведении балансов

На примере рассматриваемой газотурбинной установки GTX-100 определены также предельные отклонения фактических значений КПД брутто при корректировке результатов измерения контролируемых параметров в ходе сведения балансов. При этом в качестве исходных данных принята выборка результатов измерения контролируемых по установке параметров за фактически отработанный месяц, а также результаты тепловых испытаний данной установки. Для каждого режима КПД брутто [1, 8] вычислялся дважды: непосредственно по результатам измерения без сведения балансов и

с использованием значений параметров, скорректированных в ходе сведения балансов по разработанной методике. На рис. 4 результаты исследования представлены в виде абсолютных отклонений КПД брутто, вычисленных указанными способами.

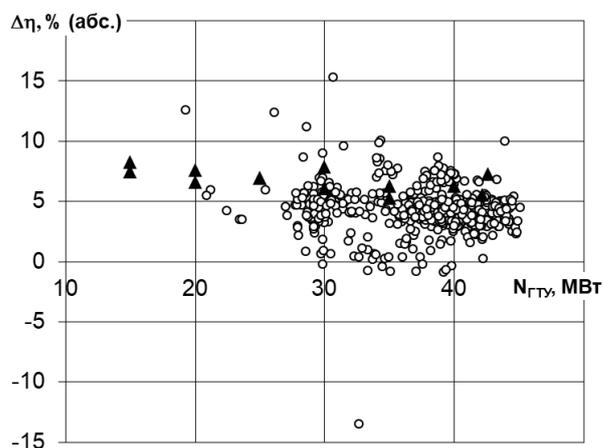


Рис. 4. Результаты расчетов КПД брутто газотурбинной установки GTX-100: $\Delta\eta$, % (абс.) – отклонение значений КПД брутто, рассчитанных двумя способами; ▲ – скорректированные результаты по данным тепловых испытаний; ○ – по данным АСУ ТП ТЭС

Выводы. Разработанная методика совместного сведения материального и энергетического балансов газотурбинных установок позволяет учитывать предельно допустимую суммарную невязку балансов по массе и энергии, а также максимальное отклонение скорректированных по результатам балансировки значений параметров от их исходных значений, обусловленное нормируемыми метрологическими характеристиками средств измерения.

Полученные результаты (рис. 2, 3) могут быть использованы также при решении задач мониторинга и диагностики технического состояния (предиктивной аналитики) оборудования. Невозможность выбора параметра регуляризации λ для одновременного выполнения ограничений по используемым при сведении балансов показателям (рис. 2, 3) свидетельствует либо о

неисправности средств измерения, либо о ненормируемых утечках энергии или массы в системе.

Полученные на примере газотурбинной установки GTX-100 предельные отклонения фактических значений КПД брутто при корректировке результатов измерения контролируемых параметров в ходе сведения балансов выявили, что ошибка значения КПД брутто, получаемая при отсутствии сведения балансов, составляет в среднем 4,8 % с отклонениями до 15 % в отдельных режимах. Такие результаты подтверждают, что для газотурбинных установок разработка обоснованных методик сведения материальных и энергетических балансов при обработке результатов измерения контролируемых параметров является актуальной. Для решения большинства задач при эксплуатации ТЭС (оптимизация режимов работы, мониторинг показателей тепловой экономичности, диагностика технического состояния оборудования и др.) требуется точность расчета, на порядок меньшая полученных значений ошибки [9–12].

В дальнейшем для более детального и точного анализа возможен выбор различных параметров регуляризации λ для разных технологических параметров с учетом реальных метрологических характеристик системы мониторинга.

Список литературы

1. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.
2. Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Теплоэнергетика. – 2015. – № 8. – С. 72–80. DOI: 10.1134/S0040363615080032.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
4. Hoerl A.E., Kennard R.W. Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems // *Technometrics*. – 1970. – No. 12. – P. 55–67.
5. Hoerl A.E., Kennard R.W. Ridge regression – 1980. *Advances, algorithms, and applications* // *Amer. J. Math. Management Sci.* – 1981. – No. 1. – P. 5–83.
6. Тверской Ю.С. Методологические аспекты машинной аппроксимации частотных характеристик с оценкой меры адекватности моделей объектов управления // *Теплоэнергетика*. – 1990. – № 11. – С. 34–39.
7. Тверской Ю.С. Автоматизация пылеугольных котлов электростанций. – СПб.: Лань, 2018. – 472 с.
8. Горшков А.С. Техничко-экономические показатели тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
9. Урин В.Д., Кутлер П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.
10. Борисов А.А. Программный комплекс для оптимального ведения режима работы теплоэлектростанции // *Вестник ИГЭУ*. – 2008. – Вып. 4. – С. 24–27.
11. Arakelyan E.K., Minasyan S.A., Agababyan G.E. Methodical principles of multicriterial optimization of daily operating conditions of power equipment at thermal power stations // *Thermal Engineering*. – 2006. – Vol. 53, No. 10. – P. 767–771.
12. Учет эффективности отсеков проточной части турбоустановок при расчетном анализе их энергетических характеристик / К.Н. Бубнов, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский // *Вестник ИГЭУ*. – 2019. – Вып. 3. – С. 62–68.

References

1. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Raschet i normirovanie pokazateley teplovoy ekonomichnosti oborudovaniya TES* [Calculation and normalization of indicators of thermal efficiency of the TPP equipment]. Ivanovo, 2015. 468 p.
2. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P., Razinkov, A.A. *Teploenergetika*, 2015, no. 8, pp. 72–80.
3. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow, Nauka, 1979. 285 p.
4. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems. *Technometrics*, 1970, no. 12, pp. 55–67.
5. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge regression – 1980. *Advances, algorithms, and applications*. *Amer. J. Math. Management Sci.*, 1981, no. 1, pp. 5–83.
6. Tverskoy, Yu.S. *Teploenergetika*, 1990, no. 11, pp. 34–39.
7. Tverskoy, Yu.S. *Avtomatizatsiya pylougol'nykh kotlov elektrostantsiy* [Automation of pulverized coal boilers of power plants: monograph]. Saint-Petersburg: Lan', 2018. 472 p.
8. Gorshkov, A.S. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsiy* [Technical and economic indicators of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 240 p.
9. Urin, V.D., Kutler, P.P. *Energeticheskie kharakteristiki dlya optimizatsii rezhimov elektrostantsiy i energosistem* [Energy characteristics for optimizing the regimes of power plants and power systems]. Moscow: Energiya, 1974. 136 p.
10. Borisov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2008, issue 4, pp. 24–27.
11. Arakelyan, E.K., Minasyan, S.A., Agababyan, G.E. *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, no. 10, pp. 767–771.
12. Bubnov, K.N., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 3, pp. 62–68.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.58

Дмитрий Владиславович Коробков

Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники, ведущий инженер Института силовой электроники НГТУ, Россия, Новосибирск, e-mail: korobkov@corp.nstu.ru

Методика и результаты анализа качества выходной энергии автономных систем электроснабжения переменного напряжения с модульными статическими преобразователями в установившемся режиме

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современные автономные системы электроснабжения переменного напряжения с высокочастотными модульными статическими преобразователями работают в условиях большого диапазона изменения параметров первичного источника электрической энергии и нагрузки с режимами прерывистых фазных токов модулей статических преобразователей. Автономные системы электроснабжения с высокочастотными модульными статическими преобразователями характеризуются сложным спектральным составом координат выходной энергии с доминированием канонических гармоник. В связи с этим задача разработки методов анализа качества генерируемой электрической энергии такого класса автономных систем электроснабжения в широком диапазоне возмущающих факторов при доминировании канонических гармоник в координатах выходной энергии является актуальной.

Материалы и методы. Для указанного класса автономных систем электроснабжения рациональным становится применение метода временной деформации для средних на интервале постоянства структуры статических преобразователей значений координат выходной энергии при синусоидальном законе модуляции.

Результаты. Процедура исследования влияния режимов работы автономных систем электроснабжения и способов коррекции закона модуляции на качество выходной энергии продемонстрирована на примере двух типов систем. В автономных системах электроснабжения с непосредственным преобразователем частоты и естественной коммутацией с многофазным магнитоэлектрическим генератором выявлены условия худшего значения коэффициента гармоник выходного тока. Показано влияние модификации закона управления путем смещения центра модуляции и введения отрицательной обратной связи по току на возможность уменьшения коэффициента на 50 %. В автономных системах электроснабжения с промежуточным звеном постоянного напряжения и модульным двухуровневым инвертором напряжения выявлены условия худшего значения коэффициентов гармоник внутренней ЭДС и выходного тока.

Выводы. Предложенная методика анализа установившегося режима работы автономных систем электроснабжения с высокочастотными модульными статическими преобразователями позволяет выявить условия худшего качества генерируемой электрической энергии и оценить влияние на него способов управления автономными системами электроснабжения в широком диапазоне изменения параметров систем с учетом наличия прерывистых токов.

Ключевые слова: автономная система электроснабжения, непосредственный преобразователь частоты, инвертор напряжения, режим прерывистых токов, спектральный состав, канонические гармоники, качество генерируемой электрической энергии, метод анализа, статический режим работы, коррекция закона модуляции

Dmitry Vladislavovich Korobkov

Novosibirsk State Technical University, Senior Lecturer of Electronics and Electrical Engineering Department, Leading Engineer of Power Electronics Institute of NSTU, Russia, Novosibirsk, e-mail: korobkov@corp.nstu.ru

Methodology and results of analysis of output energy quality of autonomous AC power supply systems with modular static converters in steady-state mode

Abstract

Background. Modern autonomous power supply systems (APSS) of alternating voltage with high-frequency modular static converters (SC) operate under conditions of a large range of changes of the parameters of the primary source of electrical energy and load with modes of intermittent phase currents of the SC modules. APSS with high-frequency modular SC are characterized by a complex spectral distribution of the output energy coordinates with the dominance of canonical harmonics. Thus, the task to develop methods for analyzing the quality of generated electric power of such type of APSS in a wide range of disturbing factors with the dominance of canonical harmonics in the coordinates of the output energy is relevant.

Materials and methods. For the specified type of APSS, it is reasonable to use the time deformation method for the average values of the coordinates of the output energy under the sinusoidal modulation law on the interval of constancy of the SC structure.

Results. The procedure to investigate the influence of APSS operating modes and methods of correction of the modulation law on the quality of output energy is demonstrated by the example of two types of systems. The authors have defined the conditions of the worst value of the harmonic coefficient of the output current in APSS with cycloconverter and multiphase permanent magnets synchronous generator. The authors have demonstrated the effect of modifying the control law by shifting the modulation center and introducing negative current feedback on the possibility to improve the coefficient by 50 %. The authors have defined the conditions of the worst value of the harmonic coefficients of the internal EMF and output current in APSS with an intermediate DC voltage link and a modular two-level voltage inverter.

Conclusions. The proposed method to analyze the steady-state operation of APSS with high-frequency modular SC makes it possible to identify the conditions of the worst quality of generated electrical energy and assess the impact of control methods of APSS in a wide range of system parameters, considering the presence of intermittent currents.

Key words: autonomous power supply system, cycloconverter, voltage inverter, intermittent current mode, spectral distribution, canonical harmonics, quality of generated electric energy, method of analysis, static operation mode, correction of modulation law

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.011-024

Введение. В автономных системах электроснабжения (АСЭ) типа «переменная скорость – постоянная частота» (ПСПЧ) выходное напряжение первичного источника переменного напряжения нестабильно в общем случае по уровню и частоте. Стабилизация параметров электрической энергии, питающей нагрузку, осуществляется статическими полупроводниковыми преобразователями (СП) с доминированием в современных АСЭ цифровых способов реализации законов и систем управления (СУ) СП АСЭ.

На рис. 1 приведена структурная схема АСЭ, в которой первичным источником электрической энергии является синхронный генератор (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ), также имеющий название магнитоэлектрического генератора (МЭГ). Низкочастотный выходной фильтр Ф необходим для снижения до требуемого уровня высокочастотных компонент электрической энергии, питающей нагрузку Н.

Данные о параметрах входной и выходной энергии, состоянии структурных элементов и управляющие воздействия формируются на шинах Ш1...Ш3. Алгоритмы функционирования АСЭ реализуются системой управления.

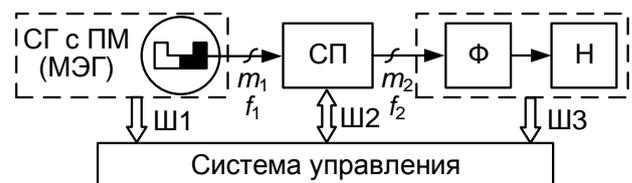


Рис. 1. Структурная схема АСЭ с СП типа ПСПЧ: m_1 – число фаз выходного напряжения СГ; f_1 – частота первой гармоники СГ; m_2 – число фаз выходного напряжения СП; f_2 – частота первой гармоники СП

Подобные АСЭ нашли широкое применение в системах генерирования электрической энергии (СГЭЭ) с переменной частотой вращения вала СГ ветровых электростанций (ВЭС) с СП типа циклоконвертер [1–3], с инверторами напряжения (ИН) [4–8]; в СГЭЭ летательных аппаратов (ЛА) с ИН [9–11], с СП типа циклоконвертер [12–14]; в комбинированных СГЭЭ [15, 16], а в системах без СГ – в приводах различного назначения [17–20] и общепромышленных системах энергоснабжения [21, 22].

На рис. 2 приведена структурная схема модульной АСЭ с девятифазным СГ [2, 3]. Нейтрали $N_{cr1}...N_{cr3}$ трех трехфазных систем 1...3 статора СГ объединены через реакторы $L_1...L_3$.

СП выполнен по схеме реверсивного вентильного преобразователя (РВП), называемого также непосредственным преобразователем частоты с естественной коммутацией (НПЧ с ЕК). Каждый из блоков А, В и С СП состоит из трех трехфазных мостовых модулей РВП (рис. 2, б, $j = 1...3$ по количеству трехфазных систем выходного напряжения девятифазного СГ), включенных параллельно по выходу. Согласование уровней напряжений и гальваническая развязка u_i ($i = A...C$) трех выходных фаз СП с напряжением $U_{ВЫХ}$ нагрузки при необходимости осуществляются силовым трансформатором T . Реакторы $L_1...L_3$ в такой топологии являются уравнивательными.

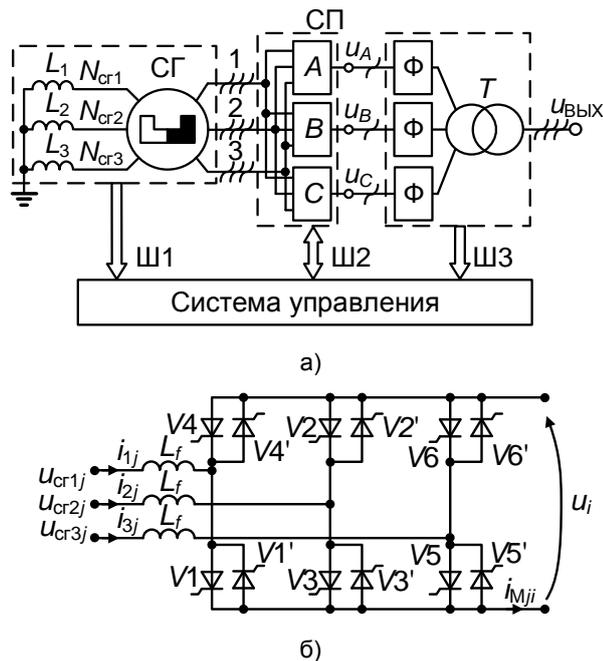


Рис. 2. АСЭ с НПЧ с ЕК: а – структурная схема АСЭ переменного напряжения с модульным СП; б – схема модуля РВП одной фазы НПЧ ($j = 1...3, i = A...C$): $V1...V6$ – прямой комплект; $V1'...V6'$ – обратный комплект

Преимуществами приведенной структуры является простота, надежность, высокий КПД, большая перегрузочная способность, низкие эксплуатационные расходы, длительный срок службы, малая стоимость [1]. Многофазность СГ и модульность СП повышают качество фазного тока СГ, а следовательно, позволяют улучшить удельные характеристики СГ для применения в АСЭ с НПЧ. Возможно сохранение работоспособности АСЭ даже при отказе нескольких вентилей модулей РВП при реализации их селективного отключения предохранителем в анодной цепи. Высокие надежность и КПД АСЭ с НПЧ сохраняют актуальность применения таких систем.

На рис. 3 приведена структурная схема модульной АСЭ с промежуточным звеном постоянного напряжения [4–6, 9–11].

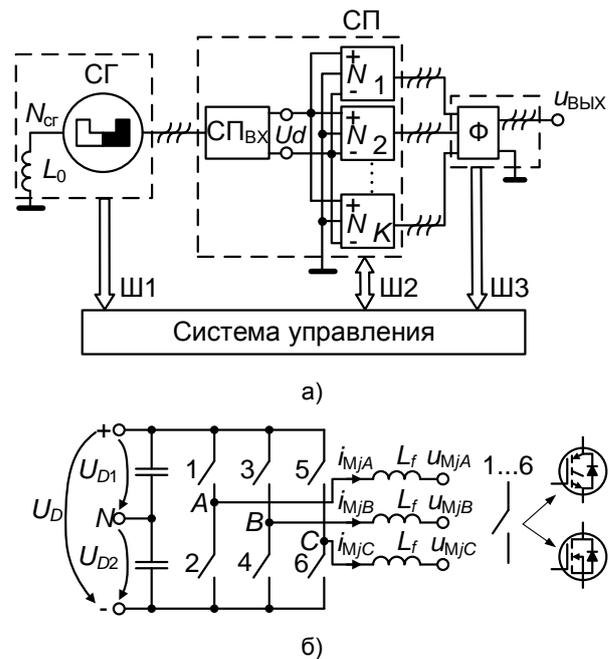


Рис. 3. АСЭ с ИН: а – структурная схема АСЭ переменного напряжения с промежуточным звеном постоянного напряжения и модульным ИН; б – схема модуля двухуровневого трехфазного ИН ($j = 1...k$)

СГ и входной статический преобразователь $СП_{ВХ}$ образуют подсистему формирования постоянного напряжения U_D . Модули $1...K$ (рис. 3, б) трехфазного двухуровневого инвертора напряжения (ИН), включенные параллельно через индуктивность L_f и емкостной фильтр Φ на общую нагрузку, образуют подсистему формирования переменного напряжения. Нейтраль четырехпроводной нагрузки соединена со средней точкой N звена постоянного напряжения и через реактор L_0 с нейтралью $N_{СГ}$ генератора. L_0 в такой АСЭ обеспечивает формирование контура протекания постоянной составляющей тока нейтрали нагрузки при наличии такой составляющей [11]. Выполнение подсистемы переменного напряжения модульной позволяет достигать лучших массогабаритных и энергетических показателей путем выбора и оптимизации параметров элементов, способов управления при более высоких частотах широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и сдвиге фаз опорных напряжений ШИМ каналов $1...K$ обратно пропорциональном их количеству K . Кроме того, повышается надежность системы за счет возможности селективного отключения аварийного модуля. Если $СП_{ВХ}$ выполнить по схеме управляемого вентильного (тисторного) преобразователя (УВП), то делать его модульным не рационально. Системы с УВП просты в реализации, обладают хорошими удельными показателями и наделяют АСЭ дополнительной функцией защиты СП и нагрузки в случае отказа СГ или подсистемы формирования переменного напряжения. Тем не менее $СП_{ВХ}$ может быть выполнен модульным в случае

применения схем инверторов напряжения, управляемых как активный выпрямитель (АВ). Основное достоинство АСЭ с АВ – высокое качество фазных токов СГ, а следовательно, и улучшенные удельные показатели СГ.

Схемы на рис. 2 и 3 позволяют реализовать независимую работу выходных фаз СП при несимметрии нагрузки фаз. Трансформатор T в таком случае должен быть выполнен групповым.

Комплексная проблема исследования, разработки и оптимизации представленных АСЭ включает задачу анализа качества выходной энергии в широком диапазоне частот вращения вала СГ и изменения параметров элементов АСЭ и нагрузки.

В соответствии со спектральным методом, мгновенное значение Y фазной координаты выходной энергии (внутренняя ЭДС, ток или напряжение) в установившемся режиме работы АСЭ с СП можно представить как сумму спектральных составляющих:

$$Y = Y_{(0)} + \Delta Y Y_{(1)} + \sum_{k=2}^{K1} Y_{(k)} + \sum_{k=j}^{\infty} Y1_{(k)} + \sum_{k=l}^{K2} Y2_{(k)}, \quad (1)$$

где $Y_{(0)}$ – постоянная составляющая; $Y_{(1)}$ – первая гармоника; $Y_{(k)}$ – канонические гармоники; $Y1_{(k)}$ – высокочастотные комбинационные гармоники; $Y2_{(k)}$ – низкочастотные комбинационные гармоники (субгармоники); ΔY – амплитудная модуляция.

Улучшение качества выходной энергии АСЭ состоит в устранении составляющих, отличных от $Y_{(1)}$, и стабилизации $Y_{(1)}$ в статических и динамических режимах.

В АСЭ с НПЧ с ЕК доминирующая причина появления составляющих, отличных от Y_1 , даже при работе на линейную нагрузку связана с несинхронностью частот f_1 и f_2 [23–27]. Кроме того, при синусоидальном законе управления наблюдается появление $Y_{(k)}$ [27, 28].

На современном этапе применения АСЭ с НПЧ с ЕК улучшение качества выходной электроэнергии достигается повышением кратности частот f_1/f_2 и эквивалентной пульсности схем (задача снижения $Y_{(0)}$, $Y2_{(k)}$, ΔY), выбором параметров и типа выходного фильтра Φ (задача снижения $Y1_{(k)}$), а также соответствующим построением системы управления (влияет на все составляющие и динамические свойства) и применением активных фильтров (рационально применять для снижения $Y2_{(k)}$ и ΔY). Ряд перечисленных мер в полной мере реализован в системах с многофазными СГ и модульными СП, подобных приведенной на рис. 2, где внимание сосредоточивается на способах снижения $Y_{(k)}$ [27, 30]. В системах с СГ выходной фильтр Φ выполняется емкостным [25].

В АСЭ с ИН устранение субгармонических составляющих и амплитудной модуляции Y возможно при целой величине кратности частот ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$ и f_2 при условии малого уровня

пульсаций постоянного напряжения U_D . Появление канонических гармоник даже при работе на линейную нагрузку обусловлено наличием режимов прерывистых фазных токов ИН [29].

В АСЭ с ИН улучшение качества выходной энергии достигается повышением частоты ШИМ, выбором параметров и типа Φ , модульностью (задача снижения $Y1_{(k)}$), величиной емкости звена постоянного напряжения ИН (задача снижения $Y_{(0)}$, $Y2_{(k)}$, ΔY), а также соответствующим построением системы управления (влияет на все составляющие и динамические свойства).

Для устранения $Y_{(0)}$ по причине наличия технологических разбросов элементов СП и несимметрии управляющих воздействий в представленных АСЭ, а также небаланса постоянных напряжений конденсаторов звена постоянного напряжения в АСЭ с ИН вводят отрицательную обратную связь по $Y_{(0)}$ [3, 30, 35, 36].

Выбор эффективного и рационального перечня мер улучшения качества выходной энергии АСЭ с СП требует разработки методов анализа свойств схем СП, определяющих решение поставленной задачи.

Методы исследования. Спектральный состав Y , в соответствии с выражением (1), как функция параметров системы и способа управления позволяет осуществить необходимый анализ установившегося режима работы. Информация о $Y_{(1)}$ необходима для методов синтеза законов управления в динамических режимах.

Методология получения Y , в соответствии с выражением (1), зависит от типа СП.

Анализ установившегося режима работы АСЭ с СП предполагает получение спектрального состава внутренней ЭДС методом переключающих функций [26–30, 32].

АСЭ с НПЧ с ЕК. По причине неполной управляемости вентилях РВП для учета влияния фазных сопротивлений первичного источника необходимы информация о мгновенном значении токов вентилях и процедура расчета углов коммутации [23, 26, 27].

На рис. 4 приведен пример диаграмм мгновенных значений выходных токов $i_{M1} \dots i_{M3}$ трех модулей РВП одной фазы, суммарного тока СП $i_{\text{СП}} = i_{M1} + i_{M2} + i_{M3}$ и первой гармоники $i_{\text{СП}(1)}$ НПЧ с ЕК системы (рис. 2) при параллельной работе с промышленной сетью, синусоидальном законе модуляции и раздельном управлении комплектами РВП.

Наличие фазового сдвига трех трехфазных систем девятифазного СГ и модульности НПЧ приводит к существенному снижению компонент $Y_{(0)}$, $Y1_{(k)}$, $Y2_{(k)}$ и ΔY в $i_{\text{СП}}$, несмотря на наличие режима прерывистых токов и заметную долю $Y1_{(k)}$ в $i_{M1} \dots i_{M3}$. В $i_{\text{СП}}$ доминируют канонические гармоники. В связи с этим в контексте поставленной задачи рационально проводить необходимый анализ по сумме $Y_{(1)} + Y_{(k)}$.

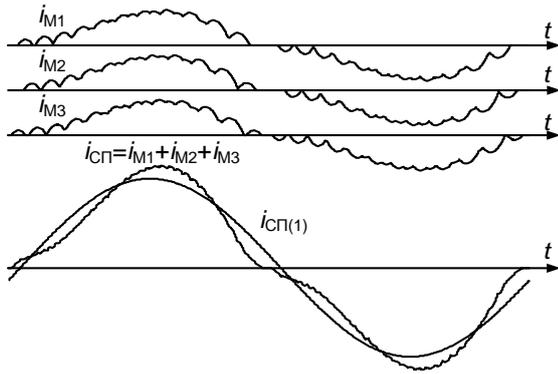


Рис. 4. Диаграммы токов элементов одной фазы НПЧ с ЕК

Экспериментальные исследования показали, что энергетические характеристики АСЭ (см. рис. 2) соответствуют девятифазной эквивалентной мостовой схеме с уравнивательным реактором и аналогичны характеристикам АСЭ на базе трех трехфазных мостовых НПЧ [3].

При величине входных индуктивностей L_f модулей РВП, обеспечивающей независимость работы НПЧ А...С трех выходных фаз, рассмотрение подобной системы возможно с высокой степенью точности на основе анализа качества выходной энергии одного модуля [27].

Анализ электромагнитных процессов в системе СГ-УВП показал, что в трехфазной мостовой схеме ($m_1 = 3$, пульсность $p = 2$) имеют место три режима постоянства структуры (рис. 5) с периодом $1/(f_1 m_1 p) = 2\pi/(3 \cdot 2) = \pi/3$, различающиеся количеством и длительностью интервалов проводящего состояния вентилялей [30].

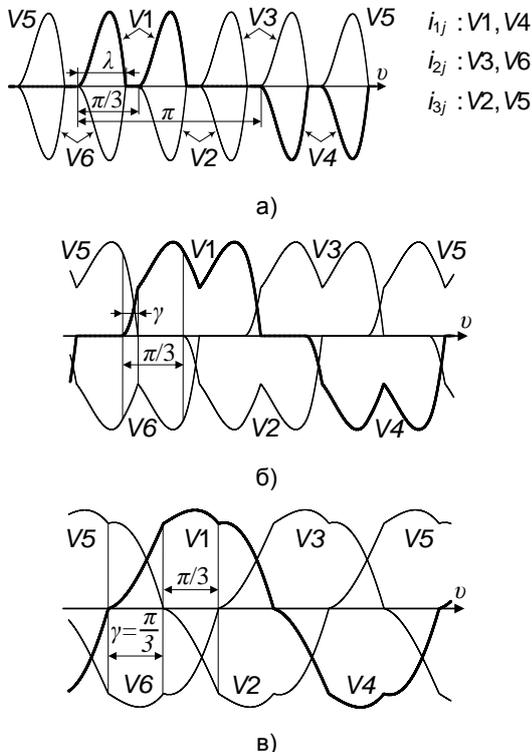


Рис. 5. Диаграммы токов вентилялей в различных режимах ($v = 2\pi f_1 t$): а – режим 1 (РПТ), $\lambda \leq \pi/3$; б – режим 2 (РНТ), $\gamma \leq \pi/3$; в – режим 3 (РНТ), $\gamma = \pi/3$

В режиме 1 прерывистых токов (РПТ) длительность проводящего состояния вентилялей составляет $\lambda \leq 2\pi/(m_1 p) = \pi/3$ (рис. 5,а). В режиме 2 непрерывных токов (РНТ) появляется угол коммутации $\gamma \leq 2\pi/(m_1 p) = \pi/3$ (рис. 5,б). В режиме 3 непрерывных токов (РНТ) $\gamma = 2\pi/(m_1 p) = \pi/3$, причём УВП становится неуправляемым.

Ниже приводятся выражения в относительных величинах в базе и допущениях по [27], которые получены с применением метода временной деформации углов управления α , длительностей проводящего состояния вентилялей λ и углов коммутации γ в выражениях для среднего на периоде $1/(f_1 m_1 p)$ значения выходного (выпрямленного) тока УВП:

– в режиме 1 (рис. 5,а) прерывистых токов (РПТ) при одновременной работе двух вентилялей по одному из анодной и катодной групп с $\lambda \leq 2\pi/(m_1 p) = \pi/3$

$$i_M(\vartheta) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi(1-X_S)} \left[\cos\{\alpha(\vartheta) - \pi/6\} - \cos\{\lambda(\vartheta) + \alpha(\vartheta) - \pi/6\} - \lambda(\vartheta) \sin\{\alpha(\vartheta) - \pi/6\} - \lambda^2(\vartheta)/(2n)u(\vartheta) \right], \quad (2)$$

$$\sin\{\lambda(\vartheta) + \alpha(\vartheta) - \pi/6\} - \sin\{\alpha(\vartheta) - \pi/6\} = \lambda(\vartheta)/n \cdot u(\vartheta) \quad (3)$$

относительно λ .

Режим 1 имеет место при

$$\alpha(\vartheta) \geq \arccos\left[\frac{\pi}{(3n)u(\vartheta)}\right]; \quad (4)$$

– в режиме 2 (рис. 5,б) непрерывных токов (РНТ) с интервалом коммутации $\gamma < 2\pi/(m_1 p) = \pi/3$ при одновременной работе трех вентилялей комплекта РВП

$$i_M(\vartheta) = \frac{3}{\pi} \frac{-1}{1-X_S} \left\{ \gamma(\vartheta) \left[\cos\left\{\gamma(\vartheta) + \alpha(\vartheta) - \frac{\pi}{6}\right\} - \cos\left\{\alpha(\vartheta) + \frac{\pi}{6}\right\} \right] - \sin\left\{\gamma(\vartheta) + \alpha(\vartheta) - \frac{\pi}{2}\right\} + \sin\left\{\alpha(\vartheta) - \frac{\pi}{2}\right\} - \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\cos\left\{\gamma(\vartheta) + \alpha(\vartheta) - \frac{\pi}{6}\right\} - \cos\left\{\alpha(\vartheta) + \frac{\pi}{6}\right\} - \frac{\{\pi/3 - \gamma(\vartheta)\}^2}{2n} u(\vartheta) \right] - \left[\frac{\pi}{3} - \gamma(\vartheta) \right] \left[I_{21}(\vartheta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left\{\gamma(\vartheta) + \alpha(\vartheta) - \frac{\pi}{6}\right\} \right] \right\}, \quad (5)$$

где

$$I_{21}(\vartheta) = \cos\left\{\alpha(\vartheta) + \frac{\pi}{6}\right\} - \cos\left\{\gamma(\vartheta) + \alpha(\vartheta) + \frac{\pi}{6}\right\} - \frac{\gamma(\vartheta)}{\sqrt{3}n} u(\vartheta); \quad (6)$$

$$\lambda(\vartheta) = \pi/3 + \gamma(\vartheta); \quad (7)$$

$\gamma(\vartheta)$ следует вычислять решением уравнения

$$\cos\left[\frac{\gamma(\vartheta) - \pi/3}{2} + \alpha(\vartheta) + \frac{\pi}{6}\right] \left[2 \sin\frac{\gamma(\vartheta)}{2} - \sqrt{3} \sin\frac{\gamma(\vartheta) - \pi/3}{2} \right] = \frac{\pi + \gamma(\vartheta)}{2\sqrt{3}n} u(\vartheta) \quad (8)$$

относительно γ .

Режим 2 имеет место при
 $\alpha(\vartheta) \geq \arccos\left[2\pi/(3\sqrt{3}n)u(\vartheta)\right] - \pi/6;$ (9)

– в режиме 3 непрерывных токов с интервалом коммутации $\gamma = 2\pi/(m_1 p) = \pi/3$ при одновременной работе трех вентилялей

$$i_M(\vartheta) = 3/[\pi(1 - X_S)] \sqrt{1 - \left\{2\pi/(3\sqrt{3}n)u(\vartheta)\right\}^2}. \quad (10)$$

Режим 3 имеет место при $\alpha(\vartheta)$ менее значения, полученного по выражению (9).

На рис. 6 приведен пример расчетов диаграмм модуляции среднего на интервале постоянства структуры СП значения i_M при синусоидальной модуляции углов управления

$$\alpha(\vartheta) = \pi/2[1 - M\sin(\vartheta)] + \Delta\alpha(\vartheta, n, M), \quad (11)$$

глубине модуляции $M = 0,7$ (динамический диапазон $M = [0 \div 1]$ соответствует $\alpha = [\pi/2 \div 0]$), разных фазовых сдвигах φ между первыми гармониками $i_{M(1)}$ тока i_M и $u_{(1)}$ выходного напряжения модуля РВП [31] без коррекции модуляции $\Delta\alpha(\vartheta, n, M) = 0$.

В выражениях (2)–(11): n – относительная величина частоты вращения вала (выходного напряжения) СГ; X_S – относительная величина взаимной индуктивности фаз СГ; $\vartheta = 2\pi f_2 t$; индексы $i = 1 \dots 3$ и $j = A \dots C$ (см. рис. 2, б) не указаны.

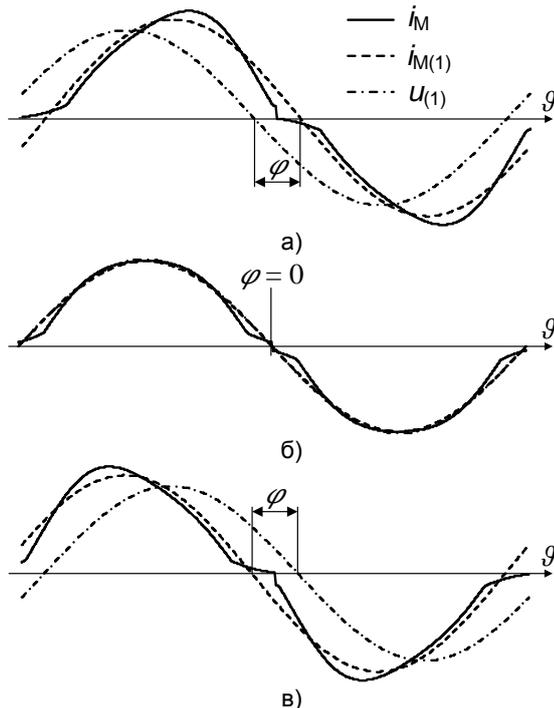


Рис. 6. Диаграммы i_M , $i_{M(1)}$ и $U_{(1)}$: а – $\varphi < 0$; б – $\varphi = 0$; в – $\varphi > 0$

Диаграммы (рис. 6) показывают характер изменения среднего значения выпрямленного тока УВП при синусоидальной модуляции α с частотой f_2 в составе РВП и демонстрируют на качественном уровне возможность осуществления расчетов i_M и $i_{СП}$ с помощью такой математической модели модульной АСЭ с НПЧ с многофазным СГ в целях анализа, разработки и

выбора средств улучшения качества выходной энергии АСЭ с НПЧ (рис. 2).

Если с помощью приведенных формул (2)–(11) рассчитать мгновенное значение i_M на периоде $1/f_2$ и применить к полученному массиву мгновенных значений i_M процедуру быстрого преобразования Фурье [31, 32, 33], то можно получить информацию о канонических гармониках координат выходной энергии системы без расчета внутренней ЭДС НПЧ.

АСЭ с ИН. Наличие нулевой паузы (мертвого времени) в импульсах управления ключами одной стойки модуля ИН (рис. 3, б), которая необходима для недопущения сквозных токов, приводит к появлению режимов прерывистых фазных токов и канонических гармоник во внутренней ЭДС [29].

На рис. 7 приведен пример диаграмм мгновенных значений фазных токов подсистемы формирования переменного напряжения СП (рис. 3, а), состоящего из двух каналов ИН, то есть при $K = 2$ (рис. 3, б), включенных параллельно на общую нагрузку при синусоидальном законе управления, введении фазового сдвига опорных напряжений ШИМ двух каналов на 180 эл. гр. и высоком качестве U_D .

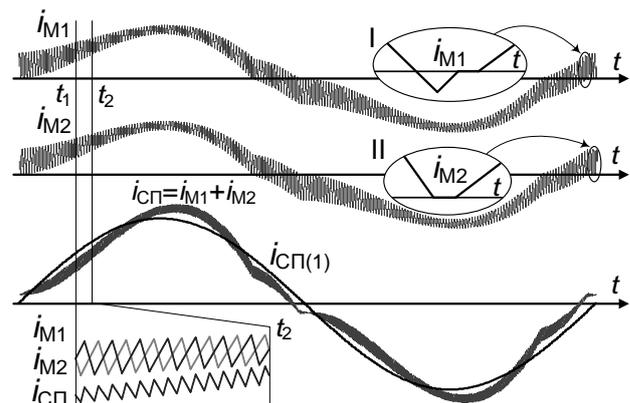


Рис. 7. Диаграммы токов одной фазы двухмодульного СП на периоде $1/f_2$: области I и II – РПТ; i_{M1} и i_{M2} – мгновенные значения токов одноименных фаз двух модулей ИН; $i_{СП} = i_{M1} + i_{M2}$ – суммарный фазный ток СП; $i_{СП(1)}$ – первая гармоника фазного тока СП

Наличие фазового сдвига опорных напряжений ШИМ каналов приводит к существенному снижению $Y_{1(k)}$ в $i_{СП}$, несмотря на наличие режима прерывистых токов (рис. 7, области I и II) и заметную долю $Y_{1(k)}$ в i_{M1} и i_{M2} . В $i_{СП}$ доминируют канонические гармоники. В связи с этим в контексте поставленной задачи рационально проводить необходимый анализ по сумме $(Y_{(1)} + Y_{(k)})$.

На рис. 8 приведены диаграммы мгновенных значений фазной внутренней ЭДС e_M , тока i_M и напряжения u_M одного модуля ИН в различных режимах на интервале формирования импульсов управления F^- нижнего четного ключа отрицательного значения ЭДС и F^+ верхнего

нечетного ключа (рис. 3,б) положительного значения ЭДС с введением нулевой паузы ϑ_d .

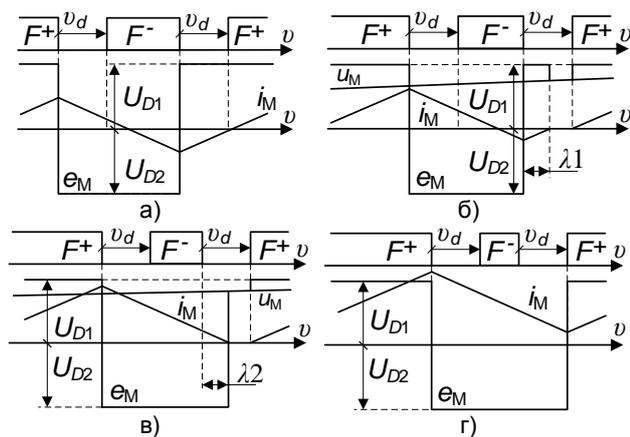


Рис. 8. Диаграммы фазных внутренней ЭДС и тока модуля ИН в различных режимах: а – РНТ1; б – РПТ1; в – РПТ2; г – РНТ2; $\nu = 2\pi f_{\text{ШИМ}}t$, $f_{\text{ШИМ}}$ – частота опорного напряжения ШИМ; индексы $j = 1 \dots K$ и $A \dots C$ не указаны

В режиме 1 непрерывных токов (рис. 8,а, РНТ1) i_M имеет знакопеременный непрерывный характер, а e_M – форму двуполярного меандра с моментами изменения знака, совпадающими с моментами спада F^- и F^+ . В режиме 1 прерывистых токов (рис. 8,б, РПТ1) i_M меняет знак до момента спада F^- , а на время $\vartheta_d - \lambda_1$ $i_M = 0$, а $e_M = u_M$. В режиме 2 прерывистых токов (рис. 8,в, РПТ2) i_M имеет однополярный характер на интервале ϑ_d ; также имеется время $\vartheta_d - \lambda_2$, когда $i_M = 0$, а $e_M = u_M$ с задержкой переднего фронта e_M на λ_2 . В режиме 2 непрерывных токов (рис. 8,г, РНТ2) i_M имеет однополярный характер, а e_M имеет форму двуполярного меандра с передним фронтом, совпадающим с передним фронтом F^+ .

Ниже приведены выражения в относительных величинах в базисе и допущениях по [29], которые получены с применением методов переключающих функций с учетом влияния РПТ:

– мгновенное значение внутренней ЭДС e_M модуля ИН

$$e_M(\vartheta) = e_{M,\text{РНТ2}}(\vartheta) + F1(\vartheta) + F2(\vartheta); \quad (12)$$

– внутренняя фазная ЭДС ИН в РНТ2 (рис. 7 и рис. 8,г, пример диаграмм на интервале $t_1 - t_2$)

$$e_{M,\text{РНТ2}}(\vartheta) = \frac{a_0(\vartheta)}{2} + \sum_{k=j}^{\infty} E1_{M,\text{РНТ2}(k)}(\vartheta), \quad (13)$$

где $E1_{M,\text{РНТ2}(k)}(\vartheta)$ – комбинационные гармоники;

$$a_0(\vartheta) = U_{D2} \left[1 - F3(\vartheta) + \frac{\vartheta_d}{\pi} \right] + U_{D1} \left[1 + F3(\vartheta) - \frac{\vartheta_d}{\pi} \right]; \quad (14)$$

– переключающая функция (ПФ) $F2(\vartheta)$ учета длительности $\lambda_2(\vartheta)$ проводящего состояния обратного диода ключа стойки ИН на интервале

ϑ_d в РПТ2 (например, рис. 7 и рис. 8,в, область I вблизи перехода тока через ноль)

$$F2(\vartheta) = \frac{F2_0(\vartheta)}{2} + \sum_{k=j}^{\infty} F21_{(k)}(\vartheta), \quad (15)$$

где $F21_{(k)}(\vartheta)$ – комбинационные гармоники $F2$;

$$F2_0(\vartheta) = [\vartheta_d - \lambda_2(\vartheta)] [u_M(\vartheta) - U_{D2}] / \pi; \quad (16)$$

$$\lambda_2(\vartheta) = \frac{2\pi U_{D1} [F3(\vartheta) + 1] - [U_{D1} - u_M(\vartheta)] \vartheta_d}{U_{D1} + u_M(\vartheta)} - 2\pi. \quad (17)$$

Если

$$F3(\vartheta) = 2 \frac{U_{D1} - u_M(\vartheta)}{U_{D1} - U_{D2}} + \frac{\vartheta_d}{\pi} - 1, \quad (18)$$

то $\lambda_2 = \vartheta_d$. Если $F3(\vartheta)$ больше значения правой части выражения (18), то имеет место РНТ2. Если $F3(\vartheta)$ меньше – имеет место РПТ2. В РНТ2 $\lambda_2 = \vartheta_d$;

– ПФ $F1(\vartheta)$ учета длительности $\lambda_1(\vartheta)$ проводящего состояния обратного диода ключа стойки модуля ИН на интервале ϑ_d в РПТ1 (например, рис. 7 и рис. 8,б, область II вблизи перехода тока через ноль)

$$F1(\vartheta) = \frac{F1_0(\vartheta)}{2} + \sum_{k=j}^{\infty} F11_{(k)}(\vartheta), \quad (19)$$

где $F11_{(k)}(\vartheta)$ – комбинационные гармоники $F1$;

$$F1_0(\vartheta) = \lambda_1(\vartheta) [U_{D1} - u_M(\vartheta)] / \pi; \quad (20)$$

$$\lambda_1(\vartheta) = \frac{[U_{D1} - u_M(\vartheta)] \vartheta_d - 2\pi [F3(\vartheta) U_{D1} - u_M(\vartheta)]}{U_{D1} - u_M(\vartheta)}. \quad (21)$$

Если

$$F3(\vartheta) = 2 \frac{U_{D2} - u_M(\vartheta)}{U_{D2} - U_{D1}} - \frac{U_{D1} - u_M(\vartheta)}{U_{D2} - U_{D1}} \frac{\vartheta_d}{\pi} - 1, \quad (22)$$

то $\lambda_1 = \vartheta_d$. РПТ1 имеет место, если $F3(\vartheta)$ больше значения правой части выражения (22). Если $F3(\vartheta)$ меньше значения правой части выражения (22), то имеет место РНТ1 (рис. 8,а). В РПТ2 и РНТ2 $\lambda_1 = 0$. В РНТ1 $\lambda_1 = \vartheta_d$. В РПТ1 и РНТ1 $\lambda_2 = 0$.

Выражения для комбинационных гармоник $E1_{M,\text{РНТ2}(k)}$ ЭДС и $F11_{(k)}$ и $F21_{(k)}$ ПФ не приведены, поскольку анализ ведется с учетом доминирования канонических гармоник, т. е. по сумме $(Y_{(1)} + Y_{(k)})$.

На рис. 9 приведен пример диаграмм модуляции среднего на интервале постоянства структуры СП значения e_M при различных значениях сдвига φ между функцией

$$F3(\vartheta) = M \sin(\vartheta) + \Delta F3(\vartheta) \quad (23)$$

и первой гармоникой напряжения $u_{M(1)}$ модуля ИН [29] без коррекции закона модуляции $\Delta F3(\vartheta) = 0$:

$$e_{M0}(\vartheta) = \{ a_0(\vartheta) + F1_0(\vartheta) + F2_0(\vartheta) \} / 2. \quad (24)$$

В выражениях (12)–(24): $\vartheta = 2\pi f_2 t$, f_2 – частота первой гармоники e_M ; $F3(\vartheta)$ – задающий синусоидальную модуляцию сигнал; ϑ_d – нулевая пауза импульсов управления одной стойки ИН; индексы $i = 1 \dots k$ и $A \dots C$ (см. рис. 3,б) не указаны.

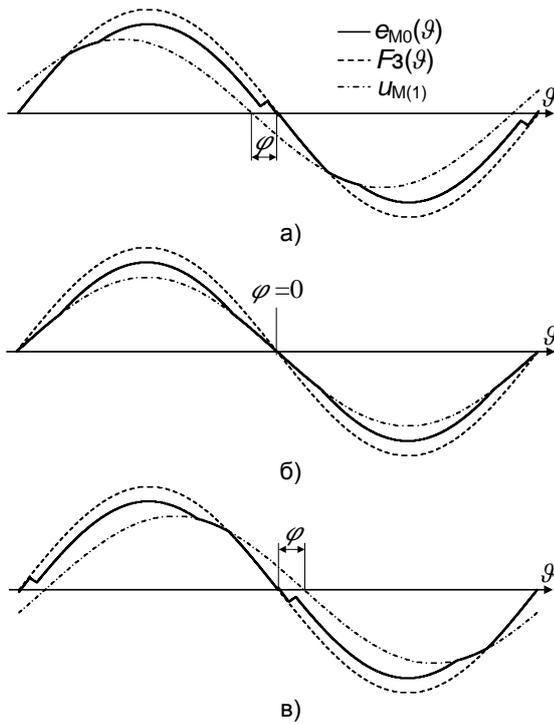


Рис. 9. Диаграммы $e_{M0}(\varphi)$, $F_3(\varphi)$ и $U_{M(1)}$ одной фазы модуля ИН на периоде $1/f_2$: а – $\varphi < 0$; б – $\varphi = 0$; в – $\varphi > 0$

Диаграммы показывают характер изменения среднего на такте $1/f_{\text{ШИМ}}$ ШИМ значения e_M при синусоидальной модуляции задающей функции F_3 с частотой f_2 и демонстрируют на качественном уровне возможность осуществления расчетов с помощью такой математической модели для анализа, разработки и выбора средств улучшения качества выходной энергии модульной АСЭ с ИН (рис. 3).

Применение процедуры быстрого преобразования Фурье [31, 32, 34] к рассчитанному с помощью приведенных выражений мгновенному значению $e_{M0}(\varphi)$ на периоде $1/f_2$ позволяет получить информацию о канонических гармониках координат выходной энергии системы.

Приведенные выражения двух типов АСЭ с СП могут быть использованы для последующего уточняющего расчета методом переключающих функций или имитационного моделирования $Y_{(0)}$, $Y_{1(k)}$, $Y_{2(k)}$ и ΔY указанных АСЭ при комплексной оценке выбранных средств улучшения качества выходной энергии.

При цифровой реализации законов управления АСЭ с СП измерение и вычисление управляемых координат в подавляющем большинстве случаев осуществляется один раз за такт постоянства структуры СП: один раз в период $1/(f_2 m_1 p)$ в АСЭ с НПЧ и один раз в период $1/f_{\text{ШИМ}}$ ШИМ в АСЭ с ИН. Такая дискретизация по времени функционирует как низкочастотный фильтр составляющих $Y_{1(k)}$. В связи с этим в контексте представленной задачи логично применение предложенного аппарата анализа качества выходной энергии АСЭ с СП при разработке способов управления с цифровой реализацией СУ.

Результаты исследования. АСЭ с НПЧ.

На рис. 10–12 приведены некоторые результаты расчетов, осуществленные по предложенной методике с использованием выражений (2)–(11) при амплитуде первой гармоники выходного напряжения фазы РВП $U_{(1)} = 0,5$.

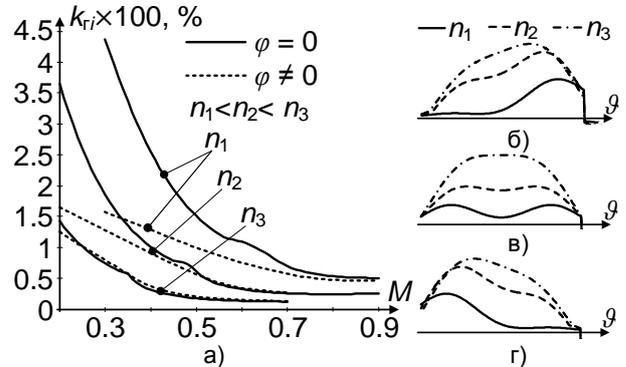


Рис. 10. Синусоидальный закон модуляции при $\Delta\alpha(\varphi, n, M) = 0$, $n_1 = 1,21$, $n_2 = 1,5$, $n_3 = 2$: а – графики $k_{ri} = f(n, M)$; б – диаграммы полувольты $i_M(\varphi)$ при $\varphi < 0$; в – диаграммы полувольты $i_M(\varphi)$ при $\varphi = 0$; г – диаграммы полувольты $i_M(\varphi)$ при $\varphi > 0$

При $\Delta\alpha(\varphi, n, M) = 0$ коэффициент гармоник k_{ri} тока i_M , вычисленный по $Y_{(k)}$ компонентам, имеет высокое значение со снижением до диапазонов 25–30 % при росте n с $M = [0,5-0,9]$ (рис. 10).

Зона излома регулировочной характеристики первой гармоники $i_{M(1)} = f(M, n)$ тока i_M (рис. 11, а) смещается от значений $M = [0,5-0,55]$ при низких n к значениям $M = [0,3-0,35]$ при больших n .

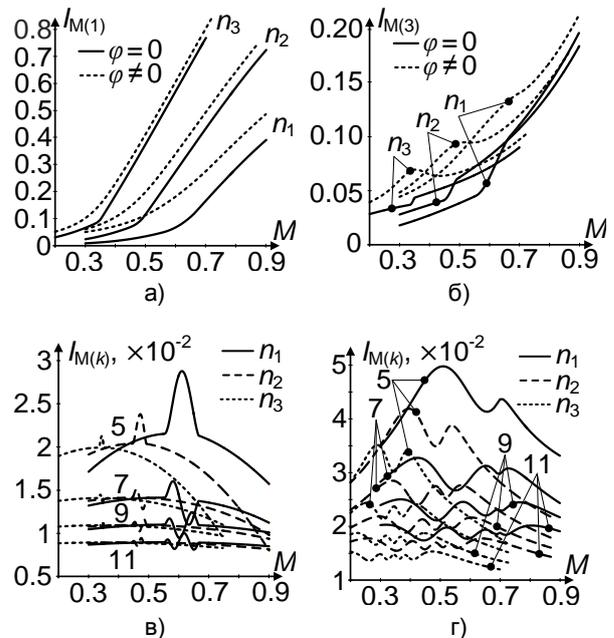


Рис. 11. Синусоидальный закон модуляции при $\Delta\alpha(\varphi, n, M) = 0$, $n_1 = 1,21$, $n_2 = 1,5$, $n_3 = 2$: а – графики $i_{M(1)} = f(n, M)$; б – графики $i_{M(3)} = f(n, M)$; в – графики $i_{M(k)} = f(n, M)$ при $\varphi = 0$; г – графики $i_{M(k)} = f(n, M)$ при $\varphi \neq 0$

Амплитуды нечетных канонических гармоник $I_{M(3...11)}$ выше при $\varphi \neq 0$ (рис. 11,б–г). Зона локальных экстремумов $I_{M(5...11)} = f(M, n)$ при $\varphi = 0$ уже (рис. 11,в), чем при $\varphi \neq 0$ (рис. 11,г) и смещается в область меньших M при увеличении n .

Исследование влияния на k_{ri} способа коррекции закона модуляции в виде изменяемого смещения центра модуляции $\Delta\alpha(\vartheta, n, M) = \Delta\alpha$ (рис. 12,а,б) показывает, что на каждом значении $I_{M(1)}$ существует максимальная оптимальная величина $\Delta\alpha_{\text{опт}}$, при которой k_{ri} имеет минимальное значение $k_{ri\text{min}}$.

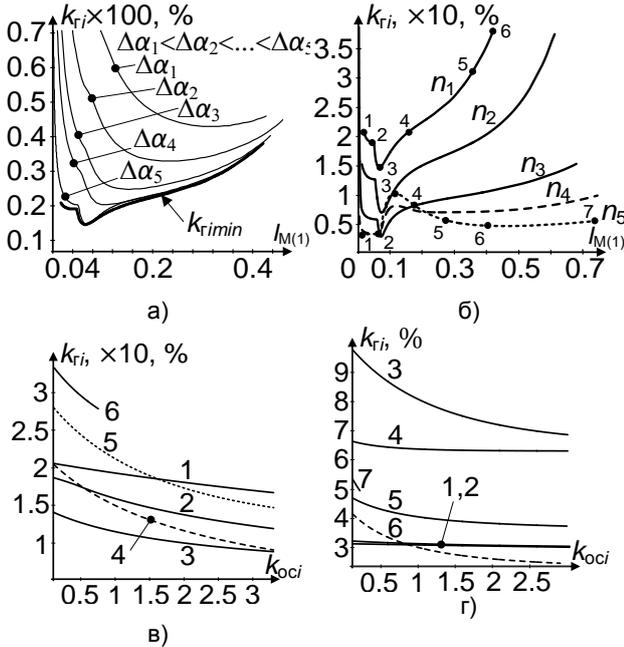


Рис. 12. Графики $k_{ri} = f(\Delta\alpha, I_{M(1)}, k_i)$ при синусоидальном законе модуляции, $\Delta\alpha \neq 0$, $\varphi = 0$: а – $n_1=1,21$; б – $k_{ri} = \min$, $n_1=1,21$, $n_2 = 1,3$, $n_3 = 1,5$, $n_4 = 1,7$, $n_5 = 2$; в – точки 1...6 графиков (б) при n_1 и $k_i = 0,1...3$; г – точки 1...7 графиков (б) при n_5 и $k_i = 0,1...3$

При частоте вблизи и более значений $n_4 \approx 1,7$ (рис. 12,б) в области величин $I_{M(1)} = (0,07 \div 0,2)$ наблюдается увеличение k_{ri} по сравнению с $n < n_4$. При указанном способе формирования $\Delta\alpha(\vartheta, n, M)$ возможно улучшение k_{ri} в 2–5 раз и более до значений менее 20 % при малых n в области $I_{M(1)} < 0,2$ с уменьшением до значений менее 10 % с ростом n в области $I_{M(1)} < 0,7$.

В современных АСЭ с СП наличие многоконтурных систем автоматического регулирования (САР) является обязательным. Причем в таких САР всегда присутствует внутренний контур тока по $i_{cn}(\vartheta)$.

Дополнительная к описанному способу формирования $\Delta\alpha(\vartheta, n, M)$ коррекция закона управления в виде отрицательной обратной связи (ООС) по мгновенному значению $i_{cn}(\vartheta)$

$$\Delta\alpha(\vartheta, n, M) = \Delta\alpha_{\text{опт}} - k_{oci} i_{cn}(\vartheta), \quad (25)$$

где k_{oci} – коэффициент усиления ООС, показывает возможность улучшения k_{ri} еще в 1,3–2 раза (рис. 12,б–г, точки 1...7 графиков $k_{ri\text{min}}$ при

$\Delta\alpha_{\text{опт}}$). Следует отметить, что не во всем диапазоне $I_{M(1)}$ при фиксированной n коэффициент k_{ri} одинаково чувствителен к k_{oci} (рис. 12,в,г). Так, при малых значениях n (рис. 12,б, при $n = n_1$) в диапазоне $I_{M(1)} < 0,4$ (точки 1...5) наихудший результат соответствует точке 1 малых токов с усилением влияния k_{oci} от точки 2 к точке 5. При увеличении n (рис. 12,б,г, $n = n_5$) в зоне малых токов $I_{M(1)} < 0,1$ (точки 1 и 2) с наилучшим $k_{ri\text{min}}$ влияние k_{oci} минимально. В точке 3 этой кривой влияние максимально, в точке 4 опять ослабляется, а к точкам 5 и 6 вновь усиливается. То есть максимум $k_{ri\text{min}}$ точки 3 при $\Delta\alpha_{\text{опт}}$ с ростом k_{oci} смещается в диапазон токов точки 4 анализируемой кривой.

АСЭ с ИН. На рис. 13–17 приведены некоторые результаты расчетов, осуществленные по предложенной методике с использованием выражений (12)–(23) при синусоидальной модуляции по (24) с $\Delta F_3(\vartheta) = 0$ и амплитуде первой гармоники выходного напряжения модуля ИН $U_{M(1)} = 0,5$.

Исследование влияния величины ϑ_d и фазового сдвига φ на коэффициент гармоник k_{re} внутренней ЭДС $e_m(\vartheta)$ модуля ИН, вычисленный по $Y_{(k)}$ компонентам (рис. 13) при $\Delta F_3(\vartheta) = 0$, показывает существенное отличие характеристик $k_{re} = f(M, \vartheta_d, \varphi)$ при $\varphi = 0$ (рис. 13,а) и $\varphi \neq 0$ (рис. 13,б). Так, при $\varphi = 0$ с увеличением M k_{re} растет и существует экстремум $k_{re\text{max}}$. При $\varphi \neq 0$ с увеличением M k_{re} монотонно снижается. При $\varphi = 0$ в области $k_{re\text{max}}$ значения k_{re} выше, чем значения k_{re} при $\varphi \neq 0$ при том же диапазоне M и одинаковых ϑ_d . Существует диапазон малых M , при котором k_{re} при $\varphi \neq 0$ выше, чем при $\varphi = 0$. Общим у этих характеристик является увеличение k_{re} с ростом ϑ_d .

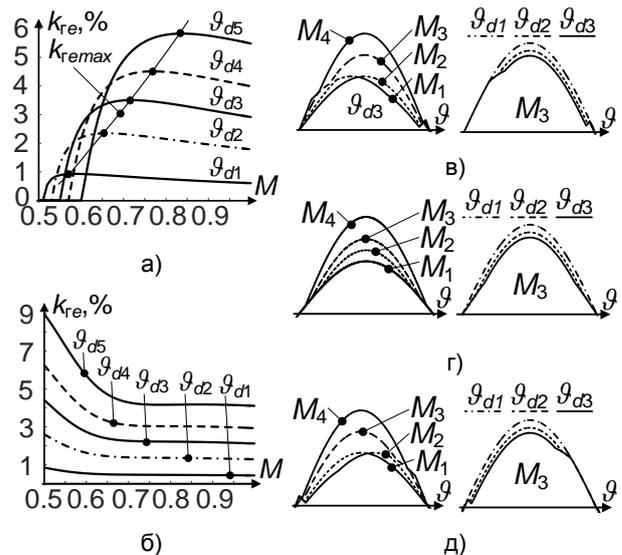


Рис. 13. Синусоидальный закон модуляции: а – $k_{re} = f(M, \vartheta_d)$ при $\varphi = 0$; б – $k_{re} = f(M, \vartheta_d)$ при $\varphi \neq 0$; в – диаграммы полуволны $e_{m0}(\vartheta)$ при $\varphi < 0$ при различных M ; г – диаграммы полуволны $e_{m0}(\vartheta)$ при $\varphi > 0$ при различных M

С ростом φ и ϑ_d появляется излом регулировочной характеристики (РХ) $I_{M(1)} = f(M, \vartheta_d, \varphi)$ (рис. 14). Причем до M в диапазоне излома наклон РХ меньше при больших φ (рис. 14,б).

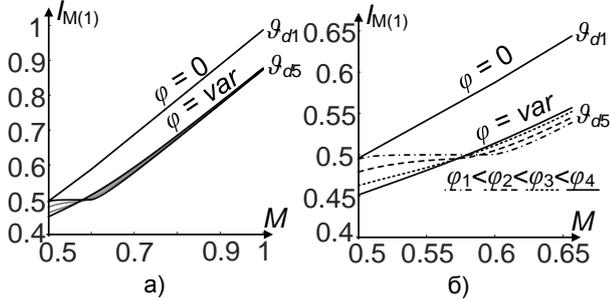


Рис. 14. Синусоидальный закон модуляции при $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3 < \varphi_4$: а – $I_{M(1)} = f(M, \vartheta_d)$; б – $I_{M(1)} = f(M, \vartheta_d)$ в диапазоне $M = [0,5; 0,65]$

При $\vartheta_d \neq 0$ в характеристике $I_{M(3)} = f(M, \varphi)$ (рис. 15,а) имеется минимум, который смещается вправо при увеличении φ . Характеристики $I_{M(k)} = f(M, \varphi)$ при $k > 3$ (рис. 15,а, $k = 5$ и рис. 15,б, $k = 7$) имеют несколько локальных экстремумов со сложной зависимостью диапазонов M роста и уменьшения $I_{M(k)}$ при изменении φ . Так, например, $I_{M(5).min}$ (рис. 15,а, кривая *min*) при $M > 0,6$ смещается вправо с ростом φ . Значения $I_{M(5)}$ на спадающем участке $I_{M(5)} = f(M, \varphi)$ до этой точки выше при больших φ . Значения $I_{M(5)}$ на возрастающем участке $I_{M(5)} = f(M, \varphi)$ после этой точки выше при меньших φ . Аналогичная картина имеет место и с $I_{M(7)} = f(M, \varphi)$ при $M > 0,7$ (рис. 15,б, кривая *min*).

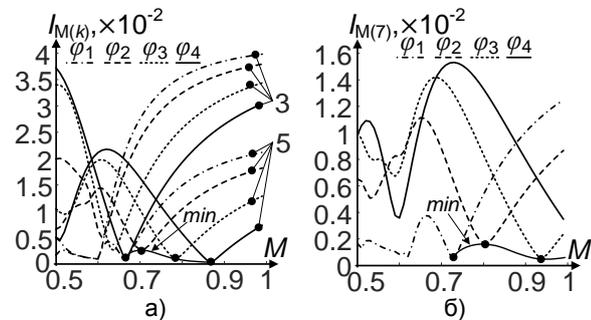


Рис. 15. Синусоидальный закон модуляции $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3 < \varphi_4$ при ϑ_{d5} : а – $I_{M(k)} = f(M, \varphi)$, $k = 3$ и $k = 5$; б – $I_{M(7)} = f(M, \varphi)$

При изменении φ от 0 до $\pm\pi/10$ локальный экстремум зависимости $k_{re} = f(I_{M(1)}, \varphi)$ вблизи $I_{M(1)} = 0,4$ (рис. 16,а, кривая *max*) снижается и при $|\varphi| \geq \pi/10$ отсутствует, а $k_{re} = f(I_{M(1)}, \varphi)$ становится монотонно убывающей.

Зависимость $k_{ri} = f(I_{M(1)}, \varphi)$, вычисленная по $Y_{(k)}$ компонентам (рис. 16,б), монотонно убывающая, кроме диапазона малых φ и $I_{M(1)} < 0,05$, в котором с ростом $I_{M(1)}$ увеличивается и k_{ri} . В окрестности значений $\varphi = \pm\pi/10$ при $I_{M(1)} > 0,3$ и $\varphi = const$ наблюдается ослабление зависимости k_{ri} от $I_{M(1)}$ вплоть до значений $I_{M(1)} = [0,8 \div 0,9]$.

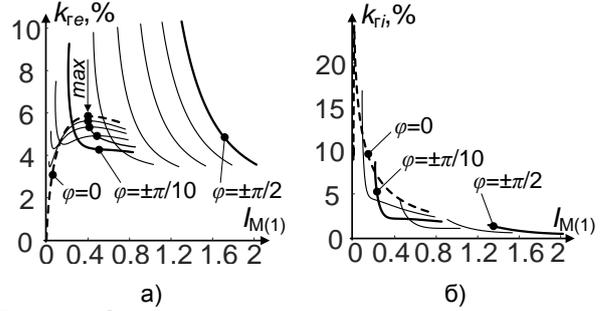


Рис. 16. Синусоидальный закон модуляции при ϑ_{d5} и $M = [0,5 \div 1]$: а – $k_{re} = f(I_{M(1)}, \varphi)$; б – $k_{ri} = f(I_{M(1)}, \varphi)$

На рис. 17 приведены некоторые результаты исследования влияния на k_{re} и k_{ri} ООС по мгновенному значению тока $i_{cn}(\vartheta)$ вида

$$\Delta F_3(\vartheta) = -k_{oci} i_{cn}(\vartheta). \quad (26)$$

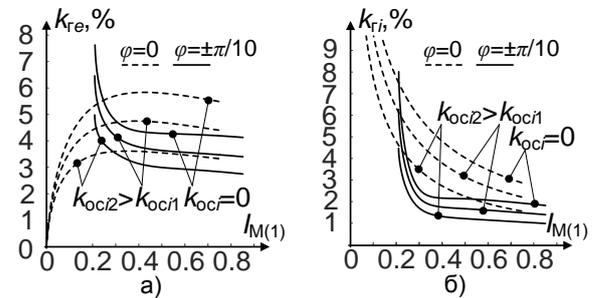


Рис. 17. Синусоидальный закон модуляции при ϑ_{d5} и $M = [0,5 \div 1]$: а – $k_{re} = f(I_{M(1)}, \varphi, k_{oci})$; б – $k_{ri} = f(I_{M(1)}, \varphi, k_{oci})$

При $\varphi = 0$ в области токов $I_{M(1)} > 0,1$ (рис. 17,а) улучшение k_{re} достигает 40 %, а k_{ri} (рис. 17,б) – 30–50 %. При $\varphi \neq 0$ влияние k_{oci} на k_{re} слабее при больших значениях $I_{M(1)}$: улучшение k_{re} достигает 35 % в области малых токов со снижением 25–30 % при увеличении $I_{M(1)}$. Причем улучшение k_{ri} при $\varphi \neq 0$ достигает 50 % во всем диапазоне токов.

Выводы. Предложенная методика анализа качества выходной энергии модульных автономных систем энергоснабжения (АСЭ) с высокочастотными статическими преобразователями (СП) учитывает наличие режимов прерывистых токов, условия их существования в широком диапазоне изменения параметров систем и доминирование канонических гармоник в спектральном составе выходных фазных токов СП.

Применение метода временной деформации к среднему за период постоянства структуры СП значению анализируемой координаты выходной энергии при синусоидальном законе модуляции с частотой основной гармоники выходной энергии продемонстрировано некоторыми результатами исследований АСЭ с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ) и многофазным магнитоэлектрическим генератором, а также АСЭ с СП с промежуточным звеном постоянного напряжения и модульным выходным двухуровневым инвертором напряжения.

Коэффициент гармоник k_{ri} выходного фазного тока $i_{\text{сп}}$ в АСЭ с НПЧ имеет очень высокие значения со снижением в диапазон до 25–30 % при увеличении частоты напряжения f_1 генератора и глубины модуляции M .

Исследование влияния смещения центра синусоидальной модуляции на k_{ri} выявило наличие оптимальной величины смещения $\Delta\alpha_{\text{опт}}$ для каждой пары $(I_{M(1)}, f_1)$ значений амплитуды первой гармоники $I_{M(1)}$ модуля СП и f_1 . При $\Delta\alpha_{\text{опт}}$ k_{ri} минимален. При малых f_1 и M возможно снижение k_{ri} до значений в 20 % и до значений в 10 % при повышении f_1 . При $\Delta\alpha_{\text{опт}}$ дополнительная коррекция закона модуляции в виде отрицательной обратной связи (ООС) по $i_{\text{сп}}$ позволяет улучшить k_{ri} еще в 1,3–2 раза. При этом не во всем диапазоне токов k_{ri} одинаково чувствителен к коэффициенту усиления $k_{\text{осц}}$ ООС.

Зависимость коэффициента гармоник k_{re} внутренней ЭДС модуля ИН от глубины модуляции M синусоидальной ШИМ в отсутствие фазового сдвига φ между первой гармоникой тока $I_{M(1)}$ и напряжения $u_{M(1)}$ модуля имеет максимум $k_{re, \text{max}}$. При $\varphi \neq 0$ k_{re} монотонно спадает с ростом M . В окрестности значений M при $k_{re, \text{max}}$ величина k_{re} больше при $\varphi = 0$, чем в том же диапазоне M при $\varphi \neq 0$. С ростом величины мертвого времени ϑ_d увеличивается и k_{re} при любых φ .

Исследование влияния на k_{re} и k_{ri} коррекции закона модуляции в виде ООС по $i_{\text{сп}}$ показало возможность улучшения k_{re} до 40 %, а k_{ri} до 50 % при $\varphi = 0$. При $\varphi \neq 0$ влияние ООС на k_{re} слабее при больших значениях $i_{\text{сп}}$. Улучшение k_{ri} при $\varphi \neq 0$ достигает 50 % во всем диапазоне токов.

Список литературы

1. **Разработки** в области электрооборудования ветроэнергетических установок с переменной скоростью вращения ветроколеса: тез. докл. науч.-практ. конф. «Ветроэнергетика, малая гидроэнергетика и другие нетрадиционные виды электроэнергетики» / Н.Н. Лаптев, В.А. Цишевский, М.М. Юннин и др. – Новосибирск, 1994. – С. 43–45.

2. **Система** генерирования типа «синхронный генератор с РЗМ – преобразователь частоты» для ветроэнергетической установки мощностью 1000 кВт «Радуга-1» / Г.В. Грабовецкий, С.А. Харитонов, В.Ф. Лучкин и др. // Труды III Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-96 (АРЕИЕ-96). Т. 8. Силовая электроника. – Новосибирск, 1996. – С. 29–32.

3. **Результаты** испытаний системы генерирования переменного тока типа «синхронный генератор – преобразователь частоты» для ветроэнергетической установки мощностью 1000 кВт: труды III Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-96 (АРЕИЕ-96). В 11 т. Т. 8. Силовая электроника / М.В. Мартинович, С.А. Харитонов, С.В. Брованов и др. – Новосибирск, 1996. – С. 33–35.

4. **Усачев А.П., Гордейчик А.В., Рохлин А.М.** IGBT-инвертор для ветроэлектрической станции // Труды IV Междунар. конф. «Актуальные проблемы элек-

тронного приборостроения» АПЭП-98. В 16 т. Т. 7. Силовая электроника. – Новосибирск, 1998. – С. 69–71.

5. **Харитонов С.А., Коробков Д.В.** Пралельная работа инвертора на IGBT модулях с промышленной сетью // Труды IV Междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98 (АРЕИЕ-98). В 16 т. Т. 7. Силовая электроника. – Новосибирск, 1998. – С. 72–73.

6. **Стенников А.А., Коробков Д.В., Харитонов С.А.** Режим генерирования ветроэнергетической установки на базе инверторов напряжения: сб. тр. X Междунар. конф.-семинара по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM 2009). – Алтай: Эрлагол, 2009. – С. 424–427.

7. **Reza Abedi M., Kwang Y. Lee.** Smart energy storage system for integration of PMSG-based wind power plant // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting: IEEE, 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286428.

8. **A Distributed Energy Storage System Integrated in PMSG System for Mitigating Wind Farm Fluctuations and Providing Inertial Response** / Hu Bin, Nian Heng, Yang Jun, et al. // 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE): IEEE, 2021. – P. 512–516. DOI: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475691.

9. **Система** генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения / Н.И. Бородин, Д.В. Коробков, С.А. Харитонов и др. // Электротехника. – 2008. – № 6. – С. 27–32.

10. **Variable frequency generation system for aircraft** / S. Kharitonov, D. Makarov, G. Zinoviev, et al. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – USA: IEEE, 2014. – P. 917–922.

11. **Пат.** 2513113 Российская Федерация МПК H02J 3/26. Система генерирования электрической энергии трехфазного переменного тока с инвертором напряжения / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, В.В. Машинский и др.; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36.

12. **Sarakhanova R.Yu., Kharitonov S.A.** Cycle-converter Based on Six-phase Zero Circuit with High Input Power Factor // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: IEEE, 2013. – P. 341–344. DOI: 10.1109/EDM.2013.6642010.

13. **Sarakhanova R.Y., Kharitonov S.A., Dubkov I.S.** Vector control of cycloconverter with increased input power factor // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014). – Altai, Erlagol: IEEE, 2014. – P. 429–432. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882564.

14. **Sarakhanova R.Y., Kharitonov S.A.** Cycloconverter based on bridge circuit for power supply systems of autonomous objects // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016). – Altai, Erlagol: IEEE, 2015. – P. 472–476. DOI: 10.1109/EDM.2015.7184587.

15. **Sarakhanova R.Y., Zharkov M.A.** Method of higher harmonic components compensation in the output voltage spectrum of the starter-generator system of the aircraft // International Ural conference on electrical power engineering (UralCon 2020). – Chelyabinsk: IEEE, 2020. – P. 258–263. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216302.

16. **The Adaptive Starter-Generator System for Aircraft** / R.Yu. Sarakhanova, S.A. Kharitonov,

M.A. Zharkov, D.A. Shtein // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462314.

17. **Antunes Hélio M.A., Pires I.A., Silva S.M.** Evaluation of Series and Parallel Hybrid Filters Applied to Hot Strip Mills With Cycloconverters // IEEE Transactions on Industry Applications (Nov.–Dec. 2019, Vol. 55, Issue 6): IEEE, 2019. – P. 6643–6651. DOI: 10.1109/TIA.2019.2932966.

18. **Muhammad Abdul Goffar Khan, Md. Abdul Malek, Md. Mahmudul Hasan.** Experimental Analysis of Modified Single Phase Cycloconverter // 3rd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE). – Rajshahi, Bangladesh: IEEE, 2019. – P. 113–116. DOI: 10.1109/ICECTE48615.2019.9303558.

19. **Md. Shihab Uddin, Shuvra Prokash Biswas, Md. Kamal Hosain.** A Single Phase to Single Phase Step-Down Cycloconverter for Variable Speed Drive Applications // IEEE Region 10 Symposium (TENSymp). – Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2020 – P. 258–263. DOI:10.1109/TENSymp50017.2020.9230912.

20. **Modular Multilevel Converter and Cycloconverter Based Machine Drive Systems / Deng Fujin, Hou Jiehua, Jiang Pengyuan, et al.** // The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Singapore: IEEE, 2020. – P. 5296–5301. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9255226.

21. **Ibtissam Bessadet, Hamza Tedjini.** The Performances of Hybrid Filter in Elimination of AC-AC Converters Harmonics Pollution // 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). – Rabat, Morocco: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702849.

22. **Researching on Multiple “Phase Hopping” AC-AC Frequency Conversion Circuit / Zhengwang Xu, Ruizhang Zhang, Guozhuang Jiang, et al.** // IEEE Access (Vol. 8): IEEE, 2020. – P. 167105–167112. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022716.

23. **Заболев Р.Я.** Вентильные преобразователи частоты с непосредственной связью и естественной коммутацией: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1973. – 173 с.

24. **Грабовецкий Г.В., Заболев Р.Я., Петров Э.Л.** К вопросу расчета гармонического состава выходного напряжения НПЧ при наличии коммутационных процессов // Межвуз. сб. науч. тр. «Преобразовательная техника». – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1976. – С. 3–11.

25. **Иванцов В.В.** Разработка источника трехфазного напряжения стабильной частоты для питания электрооборудования автономного объекта: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1983. – 251 с.

26. **Грабовецкий Г.В., Куклин О.Г., Харитонов С.А.** Непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией для электромеханических систем: учеб. пособие для 4–5 курсов РЭФ (специальность 2004) дневного обучения. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 318 с.

27. **Харитонов С.А.** Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.

28. **Коробков Д.В.** Анализ статического режима работы СГЭЭ типа «МЭГ–НПЧ с ЕК» для ВЭУ с переменной частотой вращения вала ветротурбины при параллельной работе с промышленной сетью // Технічна електродинаміка.

Тематический выпуск. Силовая електроніка та енергоефективність. Ч. 3. – Київ, 2004. – С. 62–67.

29. **Коробков Д.В., Харитонов С.А.** Методика анализа внутренней ЭДС инвертора напряжения методом переключающих функций // Науч. вестник НГТУ. – 2010. – № 2. – С. 129–144.

30. **Грабовецкий Г.В., Коробков Д.В., Харитонов С.А.** Особенности работы инвертора напряжения в системе генерирования электрической энергии летательного аппарата // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2012. – № 1(18). – С. 69–79.

31. **Выгодский М.Я.** Справочник по высшей математике. – М.: Астрель, 2010. – 703 с.

32. **Кирьянов Д.В.** Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

33. **Свидетельство** 2020667836 о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Расчет среднего скользящего выходного тока непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией / Д.В. Коробков; опубл. 29.12.2020.

34. **Свидетельство** 2020613965 о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Расчет мгновенного значения и спектральный анализ внутренней ЭДС однофазного инвертора напряжения с учетом режимов прерывистых токов / Д.В. Коробков; опубл. 25.03.2020.

35. **Харитонов С.А., Лучкин В.Ф.** Вопросы параллельной работы системы генерирования ветроэнергетической установки с промышленной сетью: тез. докл. науч. конф. с междунар. участием «Проблемы электротехники». – Новосибирск, 1993. – С. 60–62.

36. **Харитонов С.А., Коробков Д.В.** Параллельная работа инвертора на IGBT модулях с промышленной сетью // Труды IV Междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП–98 (APEIE-98). В 16 т. Т. 7. Силовая электроника. – Новосибирск, 1998. – С. 72–73.

References

1. Laptev, N.N., Tsishevskiy, V.A., Yukhnin, M.M., Grabovetskiy, G.V., Kharitonov, S.A., Ivantsov, V.V., Cherevatskiy, L.M., Novosel'tsev, M.S., Geraskin, A.G. Razrabotki v oblasti elektrooborudovaniya vetroenergeticheskikh ustanovok s peremennoy skorost'yu vrashcheniya vetrokolesa [Developments in the field of electrical equipment of wind turbines with variable speed of rotation of wind wheel]. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii «Vetroenergetika, malaya gidroenergetika i drugie netraditsionnye vidy elektroenergetiki»* [Abstracts of scientific-practical conference “Wind energy, small hydropower and other alternative types of electric power industry”]. Novosibirsk, 1994, pp. 43–45.

2. Grabovetskiy, G.V., Kharitonov, S.A., Luchkin, V.F., Preobrazhenskiy, E.B., Borodin, N.I., Laptev, N.N., Yukhnin, M.M. Sistema generirovaniya tipa «sinkhronnyy generator s RZM – preobrazovatel' chastoty» dlya vetroenergeticheskoy ustanovki moshchnost'yu 1000kVt «Raduga-1» [System of generation of “synchronous generator with REM – frequency converter” type for a wind power plant with capacity of 1000 kW “Raduga-1”]. *Trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy elektronogo priborostroeniya» APEP-96 (APEIE-96)*. T. 8. *Silovaya elektronika*

[Proceedings of the III International scientific-technical conference "Current issues of electronic instrumentation" APEP-96 (APEIE-96). V. 8. Power electronics]. Novosibirsk, 1996, pp. 29–32.

3. Martinovich, M.V., Kharitonov, S.A., Brovannov, S.V., Filatov, A.V., Akimov, G.V., Korobkov, D.V. Rezultaty ispytaniy sistemy generirovaniya peremennogo toka tipa «sinkhronnyy generator – preobrazovatel' chastoty» dlya vetroenergeticheskoy ustanovki moshchnost'yu 1000 kV [Test results of alternating current generation system of "synchronous generator – frequency converter" type for wind power plant with a capacity of 1000 kV]. *Trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya» APEP-96 (APEIE-96)*. V 11 t., t. 8. *Silovaya elektronika* [Proceedings of the III International scientific-technical conference "Current issues of electronic instrumentation" APEP-96 (APEIE-96). In 11 vol., vol. 8. Power electronics]. Novosibirsk, 1996, pp. 33–35.

4. Usachev, A.P., Gordeychik, A.V., Rokhlin, A.M. IJBT-invertor dlya vetroelektricheskoy stantsii [IJBT inverter for wind power plant]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya» APEP-98*. V 16 t., t. 7. *Silovaya elektronika* [Proceedings of the IV International conference "Current issues of electronic instrumentation" APEP-98. In 16 vol., vol. 7. Power electronics]. Novosibirsk, 1998, pp. 69–71.

5. Kharitonov, S.A., Korobkov, D.V. Prallel'naya rabota invertora na IJBT modulyakh s promyshlennoy set'yu [Parallel operation of inverter on IJBT modules with industrial network]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya» APEP-98 (APEIE-98)*. V 16 t., t. 7. *Silovaya elektronika* [Proceedings of the IV International conference "Current issues of electronic instrumentation" APEP-98. In 16 vol., vol. 7. Power electronics]. Novosibirsk, 1998, pp. 72–73.

6. Stennikov, A.A., Korobkov, D.V., Kharitonov, S.A. Rezhim generirovaniya vetroenergeticheskoy ustanovki na baze invertorov napryazheniya [Generation mode of wind power plant based on voltage inverters]. *Sbornik trudov X Mezhdunarodnoy konferentsii-seminara po mikro/nanotekhnologiyam i elektronnyim priboram (EDM 2009)* [Proceedings of the X International conference on micro/nanotechnologies and electronic devices (EDM 2009)]. Altai, Erlagol, 2009, pp. 424–427.

7. Reza Abedi M., Kwang Y. Lee. Smart energy storage system for integration of PMSG-based wind power plant. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting: IEEE, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286428.

8. Bin Hu, Heng Nian, Jun Yang, Yunyang Xu, Hao Tong, Libin Yang. A Distributed Energy Storage System Integrated in PMSG System for Mitigating Wind Farm Fluctuations and Providing Inertial Response. 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE): IEEE, 2021, pp. 512–516. DOI: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475691.

9. Borodin, N.I., Korobkov, D.V., Kharitonov, S.A., Livshits, E.Ya., Yukhnin, M.M., Maslov, M.A., Levin, A.V. Sistema generirovaniya elektricheskoy energii tipa «peremennaya skorost' – postoyannaya chastota» na baze sinkhronnogo generatora s vobuzhdeniem ot postoyannykh magnetov i invertorov napryazheniya [System of generating electrical energy of "variable speed – constant frequency" type based on a synchronous generator with excitation of permanent

magnets and voltage inverters]. *Elektrotehnika*, 2008, no. 6, pp. 27–32.

10. Kharitonov, S., Makarov, D., Zinoviev, G., Korobkov, D., Sidorov, A. Variable frequency generation system for aircraft. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). USA: IEEE, 2014, pp. 917–922.

11. Kharitonov, S.A., Korobkov, D.V., Mashinskiy, V.V., Zavertan, S.N., Bachurin, P.A., Geyst, A.V., Makarov, D.V., Vorob'eva, S.V. *Sistema generirovaniya elektricheskoy energii trekhfaznogo peremennogo toka s invertorom napryazheniya* [Three-phase alternating current power generation system with voltage inverter]. Patent RF, no. 2513113, 2013.

12. Sarakhanova, R.Yu., Kharitonov, S.A. Cycle-converter Based on Six-phase Zero Circuit with High Input Power Factor. 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Novosibirsk: IEEE, 2013, pp. 341–344. DOI: 10.1109/EDM.2013.6642010.

13. Sarakhanova, R.Yu., Kharitonov, S.A., Dubkov, I.S. Vector control of cycloconverter with increased input power factor. The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014). Altai, Erlagol: IEEE, 2014, pp. 429–432. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882564.

14. Sarakhanova, R.Yu., Kharitonov, S.A. Cycloconverter based on bridge circuit for power supply systems of autonomous objects. The 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2016). Altai, Erlagol: IEEE, 2015, pp. 472–476. DOI: 10.1109/EDM.2015.7184587.

15. Sarakhanova, R.Yu., Zharkov, M.A. Method of higher harmonic components compensation in the output voltage spectrum of the starter-generator system of the aircraft. International Ural conference on electrical power engineering (UralCon 2020). Chelyabinsk: IEEE, 2020, pp. 258–263. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216302.

16. Sarakhanova, R.Yu., Kharitonov, S.A., Zharkov, M.A., Shtein, D.A. The Adaptive Starter-Generator System for Aircraft. XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). Ekaterinburg, Russia: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462314.

17. Antunes, Hélio M.A., Pires, I.A., Silva, S.M. Evaluation of Series and Parallel Hybrid Filters Applied to Hot Strip Mills With Cycloconverters. IEEE Transactions on Industry Applications (vol. 55, issue 6, Nov.–Dec. 2019). IEEE, 2019, pp. 6643–6651. DOI: 10.1109/TIA.2019.2932966.

18. Muhammad Abdul Goffar Khan, Md. Abdul Malek, Md. Mahmudul Hasan. Experimental Analysis of Modified Single Phase Cycloconverter. 3rd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE). Rajshahi, Bangladesh: IEEE, 2019, pp. 113–116. DOI: 10.1109/ICECTE48615.2019.9303558.

19. Md. Shihab Uddin, Shuvra Prokash Biswas, Md. Kamal Hosain. A Single Phase to Single Phase Step-Down Cycloconverter for Variable Speed Drive Applications. IEEE Region 10 Symposium (TENSYPMP). Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2020, pp. 258–263. DOI: 10.1109/TENSYPMP50017.2020.9230912.

20. Fujin Deng, Jiehua Hou, Pengyuan Jiang, Hanlu Zhang, Kangshun Zhu, Yihua Hu. Modular Multilevel Converter and Cycloconverter Based Machine Drive Systems. The 46th Annual Conference

of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore: IEEE, 2020, pp. 5296–5301. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9255226.

21. Ibtissam Bessadet, Hamza Tedjini. The Performances of Hybrid Filter in Elimination of AC-AC Converters Harmonics Pollution. 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). Rabat, Morocco: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702849.

22. Zhengwang, Xu, Ruizhang, Zhang, Guozhuang, Jiang, Kun, Ke, Zhuoxin, Liu. Researching on Multiple “Phase Hopping” AC-AC Frequency Conversion Circuit. IEEE Access (Vol. 8). IEEE, 2020, pp. 167105–167112. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022716.

23. Zabolov, R.Ya. *Ventil'nye preobrazovately chastoty s neposredstvennoy svyaz'yu i estestvennoy kommutatsiyey*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Valve frequency converters with direct connection and natural communication. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 1973. 173 p.

24. Grabovetskiy, G.V., Zabolov, R.Ya., Petrov, E.L. K voprosu rascheta garmonicheskogo sostava vykhodnogo napryazheniya NPCh pri nalichii kommutatsionnykh protsessov [On calculating harmonic composition of output voltage of LUF in the presence of switching processes]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Preobrazovatel'naya tekhnika»* [Interuniversity scientific proceedings “Converter equipment”]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NETI, 1976, pp. 3–11.

25. Ivantsov, V.V. *Razrabotka istochnika trekhfaznogo napryazheniya stabil'noy chastoty dlya pitaniya elektrooborudovaniya avtonomnogo ob"ekta*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of three-phase voltage source of stable frequency to power electrical equipment of autonomous facility. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 1983. 251 p.

26. Grabovetskiy, G.V., Kuklin, O.G., Kharitonov, S.A. *Neposredstvennye preobrazovately chastoty s estestvennoy kommutatsiyey dlya elektromekhanicheskikh sistem* [Direct frequency converters with natural communication for electromechanical systems]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2009. 318 p.

27. Kharitonov, S.A. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh generirovaniya elektricheskoy energii dlya avtonomnykh ob"ektov* [Electromagnetic processes in electrical energy generation systems for autonomous objects]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2011. 536 p.

28. Korobkov, D.V. Analiz staticheskogo rezhima raboty SGEE tipa «MEG–NPCh s EK» dlya VEU s peremennoy chastotoy vrashcheniya vala vetroturbiny pri parallel'noy rabote s promyshlennoy set'yu [Analysis of static mode of operation of generation system of electric power of “MEG-LUF with EK” type for a wind turbine with variable speed of wind turbine shaft in parallel operation with industrial network]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tematicheskiy vypusk. Silova*

elektronika ta energoefektivnist', Kiiv, 2004, part 3, pp. 62–67.

29. Korobkov, D.V., Kharitonov, S.A. Metodika analiza vnutrenney EDS invertora napryazheniya metodom pereklyuchayushchikh funktsiy [Technique to analyze internal EMF of voltage inverter using the method of switching functions]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2010, no. 2, pp. 129–144.

30. Grabovetskiy, G.V., Korobkov, D.V., Kharitonov, S.A. Osobennosti raboty invertora napryazheniya v sisteme generirovaniya elektricheskoy energii letatel'nogo apparata [Specific performance features of voltage inverter in electric power generation system of aircraft]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*, 2012, no. 1(18), pp. 69–79.

31. Vygodskiy, M.Ya. *Spravochnik po vysshey matematike* [Handbook of higher mathematics]. Moscow: Astrel', 2010. 703 p.

32. Kir'yanov, D.V. *Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0*. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2012. 432 p.

33. Korobkov, D.V. *Raschet srednego skol'z'yashchego vykhodnogo toka neposredstvennogo preobrazovatelya chastoty s estestvennoy kommutatsiyey* [Calculation of average sliding output current of direct frequency converter with natural commutation]. Svidetel'stvo RF 2020667836 o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM, 2020.

34. Korobkov, D.V. *Raschet mgnovennogo znacheniya i spektral'nyy analiz vnutrenney EDS odnofaznogo invertora napryazheniya s uchetom rezhimov preryvistykh tokov* [Calculation of instantaneous value and spectral analysis of internal EMF of single-phase voltage inverter taking into account modes of intermittent currents]. Svidetel'stvo RF 2020613965 o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM, 2020.

35. Kharitonov, S.A., Luchkin, V.F. Voprosy parallel'noy raboty sistemy generirovaniya vetroenergeticheskoy ustanovki s promyshlennoy set'yu [Issues of parallel operation of generation system of wind power plant with industrial network]. *Tezisy dokladov nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Problemy elektrotekhniki»* [Proceedings of scientific conference with international participants “Issues of electrical engineering science”]. Novosibirsk, 1993, pp. 60–62.

36. Kharitonov, S.A., Korobkov, D.V. Prallelnaya rabota invertora na IJBT modulyakh s promyshlennoy set'yu [Parallel operation of inverter on IJBT modules with industrial network]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya» APEP–98 (APEIE-98). V 16 t., t. 7. Silovaya elektronika* [Proceedings of the IV International conference “Current issues of electronic instrumentation” APEP-98. In 16 vol., vol. 7. Power electronics]. Novosibirsk, 1998, pp. 72–73.

УДК 621.311.001.57

Дмитрий Юрьевич Вихарев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Екатерина Андреевна Воробьева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: v_ea@rambler.ru

Дмитрий Ильгарович Ганджаев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: gandzhaev@mail.ru

Андрей Семенович Лифшиц

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: lifsey@mail.ru

Андрей Юрьевич Мурзин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, декан, Россия, Иваново, e-mail: murzin-64@mail.ru

Никита Андреевич Родин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Эквивалентирование участков электроэнергетических систем на основе режимных параметров в узлах эквивалентирования

Авторское резюме

Состояние вопроса. При моделировании установившихся и переходных режимов в электроэнергетических системах возникает задача выделения участка электрической сети для упрощения процессов, протекающих в неохватываемом эквивалентированием участке. В этом случае требуется выделить эквиваленты и взаимосвязи относительно указанного участка. Целью исследования является определение параметров эквивалентов участков энергосистем и их взаимосвязей относительно заданных узлов.

Материалы и методы. Используются методы математического моделирования элементов энергосистем, методы теории электрических цепей и методы матричного анализа. Для верификации результатов использованы электрические схемы существующих энергосистем и программный комплекс АРМ СРЗА. Реализация алгоритма осуществлена с помощью средств языка программирования Python.

Результаты. Разработан и проверен алгоритм определения параметров схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей эквивалентов при решении задачи эквивалентирования участка сети относительно заданных узлов.

Выводы. Сравнение уровней токов при коротких замыканиях по разработанному алгоритму и программному комплексу АРМ СРЗА в узлах эквивалентирования показывает высокую точность результатов эквивалентирования в соответствии с разработанным алгоритмом. Алгоритм учитывает трансформаторные связи при эквивалентировании относительно узлов, расположенных на разных классах напряжения, а также фазовые сдвиги, вызванные трансформацией «звезда-треугольник».

Ключевые слова: эквивалентирование, узел эквивалентирования, эквивалентная энергосистема, схема замещения, параметры схемы замещения, фазовый сдвиг

Dmitry Yurievich Vikharev

Ivanovo State Power Engineering University, Student, Russia, Ivanovo, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Ekaterina Andreevna Vorobyova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: v_ea@rambler.ru

Dmitry Ilgarovich Gandzhaev

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gandzhaev@mail.ru

Andrey Semenovich Lifshits

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Senior Lecturer of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: lifcey@mail.ru

Andrey Yurievich Murzin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean, Russia, Ivanovo, e-mail: murzin-64@mail.ru

Nikita Andreevich Rodin

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Equivalence of sections of electric power systems based on operating parameters in equivalence nodes

Abstract

Background. When modeling steady-state and transient operating modes in electric power systems, it is necessary to determine a section of the electrical network to simplify the processes occurring in the area not covered by equivalenting. In this case, it is necessary to identify equivalents and relationships with respect to the specified section. The purpose of the research is to determine the parameters of the equivalent sections of power systems and their relationships with respect to the given nodes.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of the elements of power systems, methods of the theory of electric circuits, and methods of matrix analysis are used. To verify the results, electrical circuits of existing power systems and the software package “Automated Workplace of Relay Protection and Automation Service” have been applied. The implementation of the algorithm is carried out using programming in the Python environment.

Results. An algorithm to determine the parameters of equivalent circuits of positive, negative and zero sequences is developed and tested when solving the problem of equivalenting a network section with respect to given nodes.

Conclusions. Comparison of the levels of currents in case of short circuits according to the developed algorithm and the software package “Automated Workplace of Relay Protection and Automation Service” in the equivalent nodes shows the high accuracy of the equivalent results in accordance with the developed algorithm. The algorithm considers transformer connections when equivalenting with respect to the nodes located at different voltage classes, as well as phase shifts caused by the star-delta conversion.

Key words: equivalence, equivalence node, equivalent power system, equivalent circuit, equivalent circuit parameters, phase shift

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.025-030

Введение. В целях выбора силового коммутационного измерительного оборудования, проектирования устройств релейной защиты и автоматике электроэнергетических систем (ЭЭС) и объектов, разработки алгоритмов автоматического управления выключателем и релейной защиты требуется получение данных о режимных параметрах системы, что представляется довольно трудоемкой задачей. Трудности определения связаны с большим количеством объектов электрической сети, которое может достигать сотен и более элементов в исходной схеме, а также с многовариантностью схемно-режимных условий [1]. Для определения токов и напряжений требуется обособить рассматриваемый участок от всей остальной сети, что позволит свести к минимуму указанные выше трудности. Однако в этом случае возникает вопрос о том, какими схемами замещения и параметрами должна быть представлена эквивалентная электроэнергетическая система, чтобы

токи и напряжения в рассматриваемом участке оставались неизменными.

Согласно [2], часть сети замещается эквивалентами, моделирующими внешнюю электрическую сеть, с их собственными и взаимными параметрами. Такое представление внешней сети позволяет с достоверной точностью получать режимные параметры исследуемого участка.

Большинство существующих алгоритмов эквивалентирования [3–7] основано на анализе матриц проводимостей и сопротивлений всей сети с последующим удалением групп узлов, относительно которых не производится эквивалентирование. Однако такие алгоритмы имеют большие объемы вычислений при эквивалентировании больших электрических схем. Отдельной проблемой является необходимость учета трансформаторных связей «звезда-треугольник» при эквивалентировании, особенно при расчетах в фазном координат-

ном базисе, что не реализовано в указанных алгоритмах [3–7].

На основе вышеизложенного поставлена задача по созданию алгоритма определения параметров эквивалентных энергосистем и их взаимосвязей относительно заданного числа узлов, в котором производится учет трансформации «звезда-треугольник».

Электрическая схема замещения энергосистемы. Основу электрической схемы замещения представляет собой совокупность собственных и взаимных ветвей электрической цепи (рис. 1).

Для исследования несимметричных режимов объекта проектирования предлагается применить метод симметричных составляющих [8]. В этом случае эквивалентная энергосистема представляется тремя схемами замещения. Схема замещения прямой последовательности эквивалентной энергосистемы включает в себя совокупность ЭДС за собственными сопротивлениями прямой последовательности. Эквивалентные взаимосвязи представляют собой сопротивления и идеальные трансформации (рис. 1).

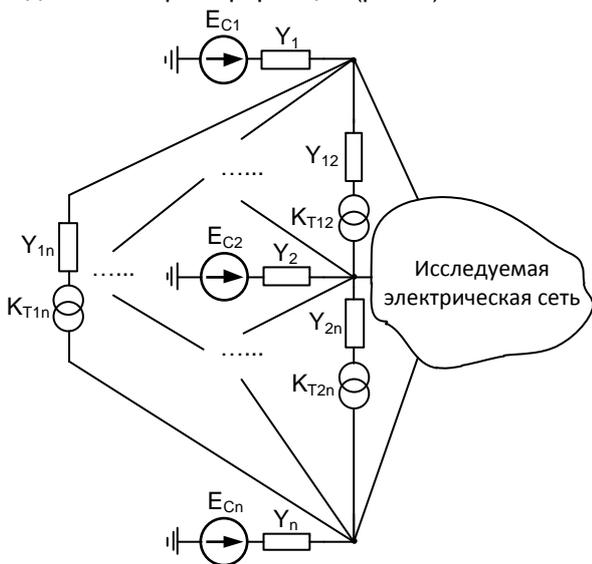


Рис. 1. Электрическая схема замещения прямой последовательности эквивалентной энергосистемы

Схема замещения обратной последовательности имеет вид схемы замещения прямой последовательности без источников ЭДС. Схема замещения нулевой последовательности представляет схему прямой последовательности без источников ЭДС и без элементов, не связанных с «землей».

Принцип определения параметров эквивалентной энергосистемы. Для определения параметров эквивалентов используется следующее правило: *токи в ветвях и напряжения в узлах эквивалентирования должны быть столь угодно близки к их же значениям в исходной неэквивалентированной схеме.* Такой подход позволяет не анализи-

ровать всю схему целиком, а получить эквивалент на основе полученных значений токов и напряжений. Более того, фазовые соотношения между токами при несимметричных повреждениях позволяют получить эквиваленты идеальных трансформаций.

При этом число собственных ветвей эквивалентов в каждой схеме равно числу узлов n , а число взаимных ветвей составляет

$$n_{\text{взаим}} = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (1)$$

Следовательно, для определения параметров эквивалентной энергосистемы определенной схемы замещения требуется произвести число опытов, равное числу взаимных связей.

Алгоритм определения параметров эквивалентной энергосистемы следующий:

1. Из расчета нормального режима без КЗ определяются значения ЭДС эквивалентов в схеме замещения прямой последовательности:

$$[\dot{E}] = [\dot{U}_{\text{HP}}] = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2. Из расчета нормального режима без КЗ по напряжениям в узлах определяются комплексные значения коэффициентов трансформации прямой последовательности:

$$[K_T^{(1)}] = \begin{bmatrix} 1 & \dot{U}_2/\dot{U}_1 & \dot{U}_3/\dot{U}_1 & \dots & \dot{U}_n/\dot{U}_1 \\ \dot{U}_1/\dot{U}_2 & 1 & \dot{U}_3/\dot{U}_2 & \dots & \dot{U}_n/\dot{U}_2 \\ \dot{U}_1/\dot{U}_3 & \dot{U}_2/\dot{U}_3 & 1 & \dots & \dot{U}_n/\dot{U}_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{U}_1/\dot{U}_n & \dot{U}_2/\dot{U}_n & \dot{U}_3/\dot{U}_n & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Комплексные значения коэффициентов трансформации обратной последовательности определяются путем выполнения операции комплексного сопряжения для каждого элемента матрицы $[K_T^{(1)}]$.

Комплексные значения коэффициентов трансформации нулевой последовательности определяются путем исключения из матрицы $[K_T^{(1)}]$ ячеек, содержащих в себе напряжения сетей с изолированной нейтралью.

3. Из опыта двухфазного короткого замыкания на землю в каждом узле эквивалентирования определяются данные о токах и напряжениях прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения (в случае эквивалентирования относительно большого числа узлов можно использовать однофазные короткие замыкания на землю):

$$[I_{K3}] = \begin{bmatrix} i_{K31(1,1)}^{(1)} & i_{K31(1,1)}^{(2)} & i_{K31(1,1)}^{(0)} \\ i_{K32(1,1)}^{(1)} & i_{K32(1,1)}^{(2)} & i_{K32(1,1)}^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{K3n(1,1)}^{(1)} & i_{K3n(1,1)}^{(2)} & i_{K3n(1,1)}^{(0)} \\ i_{K31(1)}^{(1)} & i_{K31(1)}^{(2)} & i_{K31(1)}^{(0)} \\ i_{K32(1)}^{(1)} & i_{K32(1)}^{(2)} & i_{K32(1)}^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{K3n(1)}^{(1)} & i_{K3n(1)}^{(2)} & i_{K3n(1)}^{(0)} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$[U^{(1)}] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & \dot{U}_{11}^{(1)} & \dot{U}_{12}^{(1)} & \dots & \dot{U}_{1n}^{(1)} \\ 2 & \dot{U}_{21}^{(1)} & \dot{U}_{22}^{(1)} & \dots & \dot{U}_{2n}^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n & \dot{U}_{n1}^{(1)} & \dot{U}_{n2}^{(1)} & \dots & \dot{U}_{nn}^{(1)} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$[U^{(2)}] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & \dot{U}_{11}^{(2)} & \dot{U}_{12}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{1n}^{(2)} \\ 2 & \dot{U}_{21}^{(2)} & \dot{U}_{22}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{2n}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n & \dot{U}_{n1}^{(2)} & \dot{U}_{n2}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{nn}^{(2)} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$[U^{(0)}] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & \dot{U}_{11}^{(0)} & \dot{U}_{12}^{(0)} & \dots & \dot{U}_{1n}^{(0)} \\ 2 & \dot{U}_{21}^{(0)} & \dot{U}_{22}^{(0)} & \dots & \dot{U}_{2n}^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n & \dot{U}_{n1}^{(0)} & \dot{U}_{n2}^{(0)} & \dots & \dot{U}_{nn}^{(0)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

4. Определяются собственные сопротивления последовательностей эквивалентов путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} (\dot{E}_{C1}^{(m)} - \dot{U}_{11}^{(m)}) Y_1^{(m)} + (\dot{E}_{C2}^{(m)} - \dot{U}_{12}^{(m)}) Y_2^{(m)} K_{T12}^{(m)} + \dots + (\dot{E}_{Cn}^{(m)} - \dot{U}_{1n}^{(m)}) Y_n^{(m)} K_{T1n}^{(m)} = i_{K31}^{(m)}, \\ (\dot{E}_{C1}^{(m)} - \dot{U}_{21}^{(m)}) Y_1^{(m)} / K_{T12}^{(m)} + (\dot{E}_{C2}^{(m)} - \dot{U}_{22}^{(m)}) Y_2^{(m)} + \dots + (\dot{E}_{Cn}^{(m)} - \dot{U}_{2n}^{(m)}) Y_n^{(m)} K_{T2n}^{(m)} = i_{K32}^{(m)}, \\ \dots \\ (\dot{E}_{C1}^{(m)} - \dot{U}_{n1}^{(m)}) Y_1^{(m)} / K_{T1n}^{(m)} + \dots + (\dot{E}_{C(n-1)}^{(m)} - \dot{U}_{n(n-1)}^{(m)}) Y_{(n-1)}^{(m)} / K_{T(n-1)n}^{(m)} + (\dot{E}_{Cn}^{(m)} - \dot{U}_{nn}^{(m)}) Y_n^{(m)} = i_{K3n}^{(m)}, \end{cases} \quad (8)$$

где m – рассматриваемая схема замещения определенной последовательности.

Или же в матричном виде:

$$[Y_{self}^{(m)}] = [U^{(m)}]^{-1} \cdot [I_{K3}^{(m)}], \quad (9)$$

где $[Y_{self}^{(m)}]$ – искомая матрица собственных сопротивлений рассматриваемой последовательности; $[U^{(m)}]$ – матрица падения напряжений на собственных сопротивлениях рассматриваемой последовательности; $[I_{K3}^{(m)}]$ – матрица токов в местах повреждений рассматриваемой последовательности.

5. Определяются собственные токи последовательностей систем при КЗ в узлах эквивалентирования:

$$[I_{self}^{(m)}] = \begin{bmatrix} i_{11(1,1)}^{(m)} \\ i_{22(1,1)}^{(m)} \\ \dots \\ i_{nn(1,1)}^{(m)} \\ i_{11(1)}^{(m)} \\ i_{22(1)}^{(m)} \\ \dots \\ i_{kk(1)}^{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\dot{E}_{C1}^{(m)} - \dot{U}_{11}^{(m)}) Y_1^{(m)} \\ (\dot{E}_{C2}^{(m)} - \dot{U}_{22}^{(m)}) Y_2^{(m)} \\ \dots \\ (\dot{E}_{Cn}^{(m)} - \dot{U}_{nn}^{(m)}) Y_n^{(m)} \\ (\dot{E}_{C1}^{(m)} - \dot{U}_{11}^{(m)}) Y_1^{(m)} \\ (\dot{E}_{C2}^{(m)} - \dot{U}_{22}^{(m)}) Y_2^{(m)} \\ \dots \\ (\dot{E}_{Ck}^{(m)} - \dot{U}_{kk}^{(m)}) Y_k^{(m)} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

6. Определяются взаимные сопротивления между эквивалентами путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} (-\dot{U}_{11}^{(m)} + \dot{U}_{12}^{(m)} K_{T12}^{(m)}) Y_{12}^{(m)} + \dots + (-\dot{U}_{11}^{(m)} + \dot{U}_{1n}^{(m)} K_{T1n}^{(m)}) Y_{1n}^{(m)} = i_{K31}^{(m)} - i_{11}^{(m)}, \\ (-\dot{U}_{22}^{(m)} K_{T12}^{(m)} + \dot{U}_{21}^{(m)}) K_{T12}^{(m)} Y_{12}^{(m)} + \dots + (-\dot{U}_{22}^{(m)} + \dot{U}_{2n}^{(m)} K_{T2n}^{(m)}) Y_{2n}^{(m)} = i_{K32}^{(m)} - i_{22}^{(m)}, \\ \dots \\ (-\dot{U}_{kk}^{(m)} K_{T1k}^{(m)} + \dot{U}_{k1}^{(m)}) K_{T1k}^{(m)} Y_{1k}^{(m)} + \dots + (-\dot{U}_{kk}^{(m)} K_{T(k-1)k}^{(m)} + \dot{U}_{k(k-1)}^{(m)}) K_{T(k-1)k}^{(m)} Y_{(k-1)k}^{(m)} = i_{K3k}^{(m)} - i_{kk}^{(m)}. \end{cases} \quad (11)$$

Или же в матричном виде:

$$[Y_{mutual}^{(m)}] = [U^{(m)}]^{-1} \left([I_{K3}^{(m)}] - [I_{self}^{(m)}] \right), \quad (12)$$

где $[Y_{mutual}^{(m)}]$ – искомая матрица взаимных сопротивлений рассматриваемой последовательности; $[U^{(m)}]$ – матрица падения напряжений на взаимных сопротивлениях рассматриваемой последовательности.

Таким образом, используя указанный алгоритм, определяются эквиваленты энергосистемы относительно исследуемого участка сети.

Верификация разработанного алгоритма. Для проверки разработанного алгоритма эквивалентирования создана модель электрической сети, на основе которой получены

уровни токов и напряжений в требуемых режимах. Схема участка электроэнергетической системы (рис. 2) содержит систему 220 кВ, которая связана с сетью 110 кВ через параллельные линии и автотрансформаторную подстанцию. Электрическая сеть 110 кВ представляет собой кольцевой участок с присоединением станции через параллельные линии электропередачи.

Произведем эквивалентирование относительно двух узлов сети: ПС 1 110 и ПС 1 220.

Результатом эквивалентирования является схема, представленная на рис. 3.

Произведем сравнение уровней токов КЗ в узлах эквивалентов с токами, полученными по исходной сети в программном комплексе АРМ СРЗА (см. таблицу).

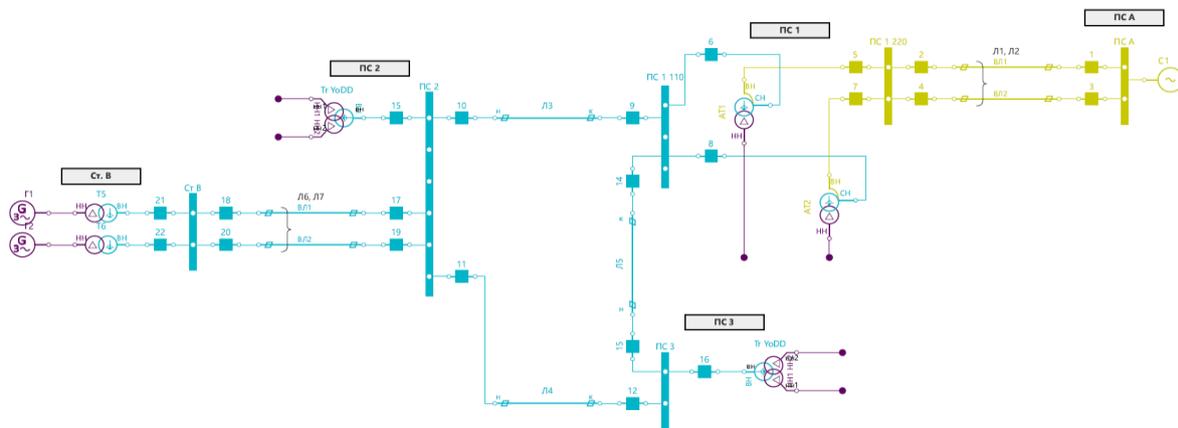


Рис. 2. Схема участка электроэнергетической системы, в которой производится эквивалентирование

Сравнение уровней токов повреждения в эквивалентной сети и исходной сети, созданной в программном комплексе АРМ СРЗА

Узел, в котором произошло повреждение	Рассматриваемый ток	Уровень тока повреждения, кА		Токковая погрешность, %	Угловая погрешность, град.
		эквивалентная сеть	исходная сеть в программном комплексе АРМ СРЗА		
Трехфазное КЗ					
ПС 1 110	I_A	$11,616e^{-j82^\circ}$	$11,617e^{-j82^\circ}$	0,01	0
ПС 1 220	I_A	$12,43e^{-j75,4^\circ}$	$12,429e^{-j75^\circ}$	-0,01	0,4
Двухфазное КЗ фаз ВС					
ПС 1 110	I_B	$9,947e^{-j172^\circ}$	$9,949e^{-j172^\circ}$	0,02	0
	I_C	$9,947e^{j8^\circ}$	$9,949e^{j8^\circ}$	0,02	0
ПС 1 220	I_B	$10,714e^{-j165,4^\circ}$	$10,713e^{-j165^\circ}$	-0,01	0,4
	I_C	$10,714e^{j14,6^\circ}$	$10,713e^{j15^\circ}$	-0,01	0,4
Двухфазное КЗ фаз ВС на землю					
ПС 1 110	I_B	$11,249e^{j158^\circ}$	$11,23e^{j158^\circ}$	-0,17	0
	I_C	$11,68e^{j36,9^\circ}$	$11,605e^{j37^\circ}$	-0,65	0
ПС 1 220	I_B	$10,638e^{-j177^\circ}$	$10,646e^{-j178^\circ}$	0,08	-1
	I_C	$11,274e^{j26,1^\circ}$	$11,253e^{j26^\circ}$	0,19	-0,1
Однофазное КЗ фазы А					
ПС 1 110	I_A	$11,32e^{-j83,4^\circ}$	$11,219e^{-j83^\circ}$	-0,9	0
ПС 1 220	I_A	$6,663e^{-j81,4^\circ}$	$6,594e^{-j81^\circ}$	-1,05	0,4

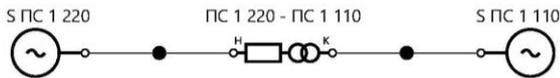


Рис. 3. Эквивалентные энергосистемы с их взаимными связями при эквивалентировании относительно узлов ПС 1 110 и ПС 1 220 автотрансформаторной подстанции ПС1

Результаты сравнения уровней токов короткого замыкания для обоих узлов эквивалентирования показывают, что токовая погрешность не превышает 2 %, а угловая погрешность – 0,5 градусов во всех рассмотренных случаях, что свидетельствует об эффективности предложенного алгоритма.

Выводы. Предложенный алгоритм эквивалентирования электроэнергетических систем позволяет определить параметры эквивалентов относительно участка электрической сети с учетом трансформаций и фазовых сдвигов. Верификация алгоритма показала высокую точность результатов моделирования.

Список литературы

1. Баранов Ю.А. Выбор уставок срабатывания микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики серии «Сириус» для распределительных сетей 6–35 кВ. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2013. – 87 с.
2. Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.
3. Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В. Эквивалентирование имитационных моделей электрических сетей // Электричество. – 2015. – № 5. – С. 22–29. – EDN TWVQUV.
4. Занарюкин В.П., Крюков А.В., Крюков Е.А. Построение эквивалентных моделей энергосистем для расчетов несимметричных режимов // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4–3. – С. 286–289. – EDN QIVPJF.
5. Воронов П.Л., Щедрин В.А. Эквивалентирование и упрощение сложных электрических систем по частям при моделировании // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 44–55. – EDN TLAMMP.
6. Молодцов В.С. Эквивалентирование распределительных электрических сетей энергосистем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 72–76. – DOI: 10.17213/0136-3360-2015-4-72-76. – EDN UIQNJD.

7. Молодцов В.С., Молодцов М.В. Эквивалентирование сложных электрических сетей энергосистем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 61–66. – DOI: 10.17213/0136-3360-2014-6-61-66. – EDN TGMILD.

8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В 3 ч. – М.: Высш. шк., 1964. – 753 с.

References

1. Baranov, Yu.A. *Vybor ustavok srbatyvaniya mikroprotsessornykh terminalov releynoy zashchity i avtomatiki serii «Sirius» dlya raspredelitel'nykh setey 6–35 kV* [Selection of actuation settings of microprocessor terminals of relay protection and automation of the Sirius series for distribution networks of 6–35 kV]. Moscow: ZAO «RADIUS Avtomatika», 2013. 87 p.
2. Losev, S.B., Chernin, A.B. *Vychislenie elektricheskikh velichin v nesimmetrichnykh rezhimakh elektricheskikh sistem* [Calculation of electrical quantities in asymmetric modes of electrical systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 528 p.
3. Lyamets, Yu.Ya, Voronov, P.I., Martynov, M.V. *Ekvivalentirovanie imitatsionnykh modeley elektricheskikh setey* [Equivalence of simulation models of electric networks]. *Elektrichestvo*, 2015, no. 5, pp. 22–29.
4. Zakaryukin, V.P., Kryukov, A.V., Kryukov, E.A. *Postroyeniye ekvivalentnykh modeley energosistem dlya raschetov nesimmetrichnykh rezhimov* [Construction of equivalent models of power systems for calculations of asymmetric modes]. *Polzunovskiy vestnik*, 2005, no. 4–3, pp. 286–289.
5. Voronov, P.L., Shchedrin, V.A. *Ekvivalentirovanie i uproshchenie slozhnykh elektricheskikh sistem po chastyam pri modelirovaniy* [Equivalence and simplification of complex electrical systems in parts in modeling]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 44–55.
6. Molodtsov, V.S. *Ekvivalentirovanie raspredelitel'nykh elektricheskikh setey energosistem* [Equivalence of distribution electrical networks of power systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2015, no. 4, pp. 72–76. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-4-72-76.
7. Molodtsov, V.S., Molodtsov, M.V. *Ekvivalentirovanie slozhnykh elektricheskikh setey energosistem* [Equivalence of complex electrical networks of power systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2014, no. 6, pp. 61–66. DOI: 10.17213/0136-3360-2014-6-61-66.
8. Bessonov, L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 3 ch.* [Theoretical foundations of electrical engineering in 3 parts]. Moscow: Vysshaya shkola, 1964. 753 p.

УДК 621.314.224.8

Андрей Анатольевич Яблоков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: andrewyablokov@yandex.ru

Павел Александрович Кабаков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистр кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: usful@bk.ru

Елена Евгеньевна Готовкина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Россия, Иваново, e-mail: elengotovkina@yandex.ru

Антон Витальевич Панащатенко

ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы», инженер, Россия, Иваново, e-mail: pan.anton_@mail.ru

Разработка и исследование катушки Роговского для работы в условиях эксплуатации открытого распределительного устройства¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Постепенный переход к использованию микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, в том числе поддерживающих прием и обработку информации, поступающей в виде цифрового кода в формате протоколов, определенных в IEC61850, а также недостатки традиционных электромагнитных трансформаторов тока обуславливают возрастающий интерес к применению катушек Роговского в качестве датчиков тока при построении вторичных систем. Несмотря на давнюю известность катушек Роговского, имеется много неизученных аспектов их функционирования в условиях эксплуатации энергообъектов на открытых распределительных устройствах, особенно при работе с современными устройствами релейной защиты и автоматики. Целью исследования является анализ влияния температуры окружающей среды на погрешность преобразования тока катушками Роговского.

Материалы и методы. Исследование катушек Роговского проведено на экспериментальных и промышленных образцах. При проведении исследований использовано современное испытательное оборудование, внесенное в Единый реестр средств измерений РФ и имеющее действующие сертификаты о поверке.

Результаты. Проведен анализ факторов, влияющих на погрешность метрологических каналов, выполненных на базе традиционных трансформаторов тока. Систематизированы факторы, оказывающие влияние на погрешность измерений катушек Роговского. Приведены экспериментальные данные, полученные в результате исследований погрешности преобразования тока катушками Роговского в широком температурном диапазоне. Установлено, что благодаря конструктивным решениям можно нивелировать влияние таких факторов, как положение первичного проводника, внешние электромагнитные поля, неравномерность намотки, количество слоев вторичной обмотки, а также температурное расширение.

Выводы. Использование материалов с низким коэффициентом линейного расширения для изготовления сердечника катушки Роговского позволяет получить метрологические характеристики преобразователя, соответствующие требованиям нормативно-технической документации, в широком температурном диапазоне. Применение катушек Роговского в качестве первичного датчика тока для систем релейной защиты и автоматики является перспективным направлением, требующим дальнейших всесторонних исследований, в том числе в процессе промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: измерительные датчики тока, катушка Роговского, метрологические характеристики, трансформаторы тока, устройства релейной защиты и автоматики

Andrey Anatolievich Yablokov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, email: andrewyablokov@yandex.ru

¹ Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» за счет стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (проект № СП-3158.2022.1).

The study is carried out at Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin at the expense of the scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and graduate students (project No. SP-3158.2022.1).

Pavel Alexandrovich Kabakov

Ivanovo State Power Engineering University, Master's Degree Student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, email: usful@bk.ru

Elena Evgenievna Gotovkina

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnology Department, Russia, Ivanovo, email: elengotovkina@yandex.ru

Anton Vitalievich Panaschatenko

Digital Instrument Transformers SPA LLC, Engineer, Russia, Ivanovo, email: pan.anton_@mail.ru

Development and research of Rogowski coil to operate under operating conditions of open switchgear

Abstract

Background. The interest to use Rogowski coils (RC) as current sensors to design secondary systems increases due to application of microprocessor relay protection and automation devices, including those that support the reception and processing of information in a form of a digital code in the format of protocols defined in IEC61850, as well as the disadvantages of traditional electromagnetic current transformers. Despite the popularity of RC, there are many unstudied issues of their functioning under operating conditions of open switchgears of power facilities, especially when operating with modern relay protection and automation devices. The aim of the study is to analyze the effect of ambient temperature on the error of current conversion by Rogowski coils.

Materials and methods. Studies of Rogowski coils have been carried out using the experimental and industrial samples. During the research modern testing equipment has been used. The equipment is listed on the Unified Register of Measuring Equipment of the Russian Federation and has valid verification certificates.

Results. The analysis of the factors influencing the error of metrological channels has been carried out. The analysis is conducted based on traditional current transformers (CT). The factors influencing the measurement error of RC are systematized. Experimental data obtained as a result of the study of the RC conversion error in a wide temperature range are presented. It has been established that due to design solutions, it is possible to neutralize the influence of such factors as the position of the primary conductor, external electromagnetic fields, uneven winding, the number of layers of the secondary winding, and thermal expansion.

Conclusions. The use of materials with a low coefficient of linear expansion to manufacture the core of the Rogowski coil makes it possible to obtain the metrological characteristics of the transducer that meet the requirements of normative technical documentation in a wide temperature range. Application of RC as a primary current sensor for relay protection and automation systems is a promising area that requires further comprehensive research, and specifically in the process of industrial operation.

Key words: measuring current sensors, Rogowski coil, metrological characteristics, current transformers, relay protection and automation devices.

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.031-040

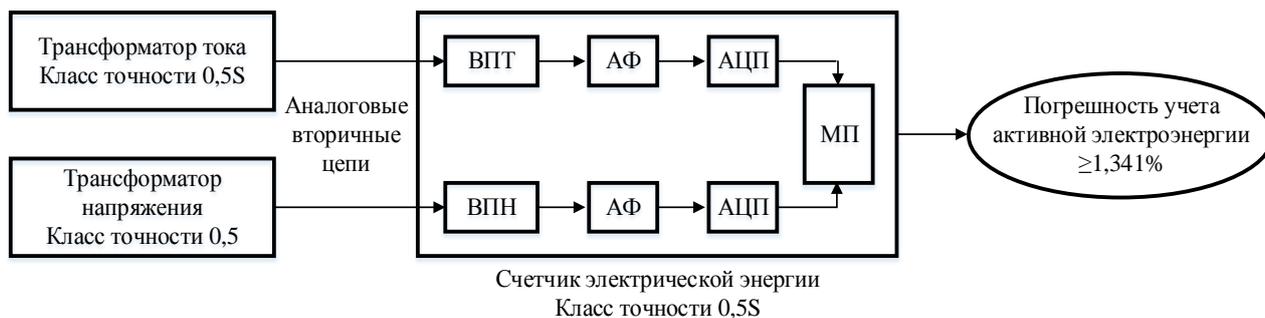
Введение. Электромагнитные трансформаторы тока (ТТ), эксплуатируемые в настоящее время на большинстве электроэнергетических объектов, имеют ряд недостатков, отмеченных в научно-технической литературе [1–8]:

1. *Влияние величины нагрузки на погрешность преобразования ТТ.* Перегрузка трансформаторов тока приводит к появлению дополнительных погрешностей преобразования. Суммарная погрешность учета активной мощности при использовании электромагнитных трансформаторов тока классов точности 0,5S при соблюдении норм по нагрузке и номинальном токе достигает 1,3 % (рис. 1), но достаточно часто из-за перегрузки или недогрузки вторичных цепей превосходит 2 % [1–3].

2. *Влияние остаточной намагниченности магнитопровода ТТ на величину его погрешности* [4, 5]. В соответствии с результатами исследований, выполненных в ОАО «СЗТТ» [4], остаточная намагниченность при-

водит к выходу ТТ из класса точности и погрешность может сохраняться длительное время (более 8 часов) при низких величинах первичного тока (менее 20 % $I_{ном}$).

3. *Искажение формы тока в переходных режимах* (особенно при коротких замыканиях (КЗ)). Это происходит из-за насыщения магнитопровода ТТ апериодической и периодической составляющими тока, в результате чего ТТ передают недостоверную информацию о токах КЗ, что приводит к задержкам и неселективной работе устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) [6]. Остаточная намагниченность магнитопровода ТТ является причиной более раннего насыщения при соответствующей полярности тока КЗ. Ложные срабатывания релейной защиты на Ростовской АЭС в 2014 году и ПС «Тамань» в 2018 году показали всю серьезность указанного недостатка электромагнитных ТТ.



$I/I_{ном}, \%$	$U = 0,8-1,2 U_{ном}; f = f_{ном} = 50 \text{ Гц}; \cos \varphi = 0,8$										
	$\delta_{рI}, \%$	$\theta_{рI}, \text{ угл. мин}$	$\delta_{рU}, \%$	$\theta_{рU}, \text{ угл. мин}$	$\delta_{р\phi}, \%$	$\theta, \text{ угл. мин}$	$\delta_{р\theta}, \%$	$\delta_{орсч}, \%$	$\delta_{рсч}, \%$	$\delta_{ИК}, \%$	
20–120	$\pm 0,5$	± 30	$\pm 0,5$	± 20	0	± 36	$\pm 0,791$	$\pm 0,6$	0	$\pm 1,341$	
5	$\pm 0,75$	± 45	$\pm 0,5$	± 20	0	± 49	$\pm 1,080$	$\pm 1,0$	0	$\pm 1,899$	
1	$\pm 1,5$	± 90	$\pm 0,5$	± 20	0	± 92	$\pm 2,023$	$\pm 1,0$	0	$\pm 3,031$	

* Погрешность рассчитана в соответствии с РД 34.11.325-90 и СТО 56947007-29.240.01.244-2017.

Рис. 1. Измерительный канал учета электрической энергии при использовании электромагнитных трансформаторов тока и напряжения: ВПТ – входной преобразователь тока; ВПН – входной преобразователь напряжения; АФ – антиализинговый фильтр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МП – микропроцессор

4. *Применение в качестве изоляции взрывоопасных наполнителей* (масло, азот, элегаз). Вследствие чего электромагнитные ТТ являются взрыво- и пожароопасным оборудованием и требуют соблюдения особых мер при эксплуатации. Так, в 2005 году на ПС 500 кВ «Чагино» произошло возгорание трансформаторов тока, в результате чего была отключена подача электроэнергии в нескольких районах Москвы, Подмосковья, Тульской, Калужской и Рязанской областях, выполнена аварийная остановка Московского нефтеперерабатывающего завода. Ущерб оценен в 5,4 млрд руб.²

5. *Высокие массогабаритные показатели электромагнитных ТТ*, которые обуславливают сложность их транспортировки, монтажа и обслуживания.

6. *Передача измерительной информации от ТТ и ТН в аналоговой форме по вторичным кабельным цепям*, количество которых в связи с реконструкциями подстанций существенно возросло. Влияние электромагнитных наводок и падение напряжения на медных кабелях из-за перегрузки вторичных цепей существенно сказываются на результирующей погрешности измерений [7, 8]³. Такое решение, как установка устройств преобразования аналогового сигнала в цифровой совместно с традиционными ТТ и ТН, не решает проблемы в полной мере, ведет к удорожанию реконструкции, необходимости размещения дополнительного оборудования на территории открытого распределительного устройства (ОРУ).

² Авария в энергосистеме Москвы 25 мая 2005 года. Досье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tass.ru/info/1992764>.

³ ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010. Трансформаторы измерительные. Часть 8. Электронные трансформаторы тока. – М.: Стандартинформ, 2012. – 98 с.

Развитие микропроцессорной техники (устройства РЗА, счетчики электрической энергии и др.), реализация положений международного стандарта IEC 61850 и концепции «Цифровая трансформация электроэнергетики» привели к созданию нового вида энергетического оборудования – нетрадиционных комбинированных преобразователей тока и напряжения с цифровым интерфейсом для учета электрической энергии (рис. 2,а) и релейной защиты (рис. 2,б).

Данные устройства прошли ряд сертификационных испытаний (в том числе, внесены в Единый реестр средств измерений) и находятся в опытно-промышленной эксплуатации. В состав устройств входят такие нетрадиционные преобразователи, как катушка Роговского (КР) и резистивный делитель напряжения, лишенные вышеуказанных недостатков электромагнитных преобразователей. Однако, в отличие от электромагнитных трансформаторов, разработанные нетрадиционные комбинированные преобразователи не имеют достаточного опыта эксплуатации. В связи с этим необходимы их всесторонние исследования как в лабораторных условиях, так и на месте эксплуатации.

Факторы, оказывающие влияние на погрешность преобразования тока катушкой Роговского. Конструкция и принцип действия катушки Роговского были впервые описаны в 1912 году немецкими учеными W. Rogowski и W. Steinhaus [9]. На текущий момент датчики тока на основе катушек Роговского находят все большее применение в современной зарубежной и отечественной энергетике. Факторы, влияющие на точность измерения данного типа первичных преобразователей, систематизированные в результате анализа научно-технической литературы [10–32], представлены на рис. 3.

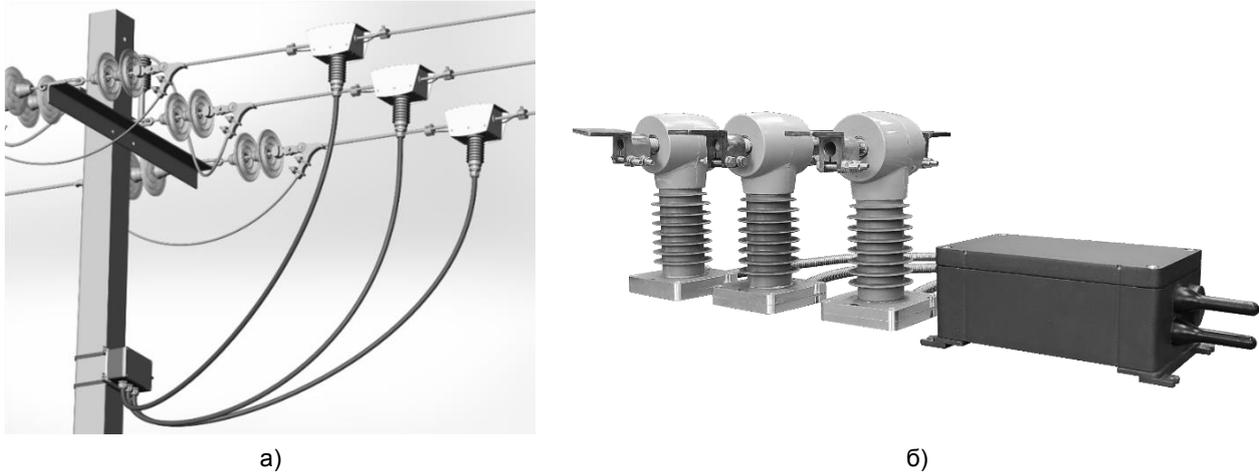


Рис. 2. Нетрадиционные комбинированные преобразователи тока и напряжения с цифровым интерфейсом, разработанные в ИГЭУ и ООО НПО «ЦИТ»: а – малогабаритные пункты коммерческого учета электроэнергии; б – цифровые трансформаторы для учета электроэнергии и релейной защиты

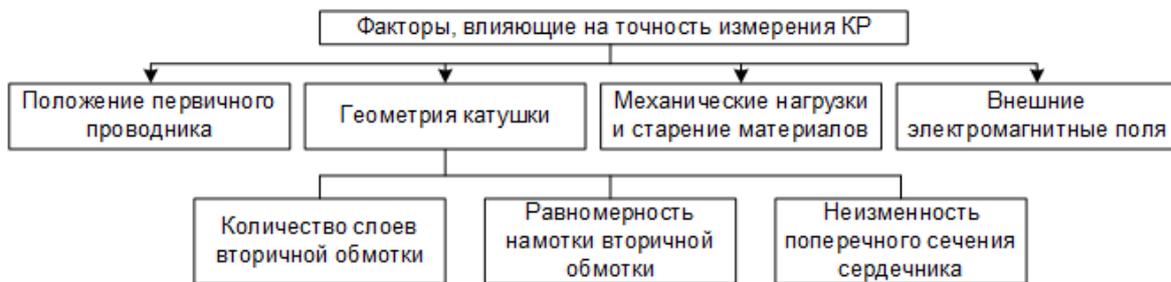


Рис. 3. Факторы, влияющие на погрешность преобразования катушки Роговского

Катушки Роговского получили широкое распространение в электротехнических установках и лабораторных испытаниях. В связи с чем температурный диапазон эксплуатации, по технической документации ведущих зарубежных производителей, составляет от минус 10 °С до плюс 40 °С. Однако для применения катушки Роговского на открытых распределительных устройствах Российской Федерации необходимо, чтобы она имела климатическое исполнение УХЛ по ГОСТ 15150-69. При этом температурный коэффициент КР составляет от 30 ppm/°С, что соответствует дополнительной погрешности 0,24 % в диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 70 °С. Данная погрешность допустима для класса точности 5P, но не допустима для класса 0,2S. Экспериментальные исследования промышленных катушек Роговского нескольких производителей подтвердили наличие зависимостей погрешности преобразователей от ряда факторов (рис. 3), некоторые из которых могут приводить к выходу катушек из их класса точности при эксплуатации на открытых распределительных устройствах РФ. Необходима разработка конструкции катушки Роговского, дополнительные погрешности которой сопоставимы с погрешностями электромагнитных ТТ.

Твердотельное исполнение нетрадиционного комбинированного преобразователя тока и напряжения, экранирование катушки Ро-

говского, проработанная и оптимизированная конструкция КР позволили исключить влияние таких факторов, как положение первичного проводника, внешние электромагнитные поля, неравномерность намотки и количество слоев вторичной обмотки. Однако материалы катушки Роговского могут изменять свои геометрические параметры под воздействием высоких и низких температур. В связи с этим исследование погрешностей преобразования катушек Роговского в широком температурном диапазоне, соответствующем условиям эксплуатации открытого распределительного устройства, является актуальным.

Исследование погрешности преобразования катушек Роговского в широком температурном диапазоне. Исследование погрешности преобразования катушек Роговского выполнено при помощи экспериментальной установки (рис. 4). Испытательная установка Omicron CMC 356 используется для генерации тока до 128 А. При необходимости получения более высоких значений тока возможно использовать повышающий трансформатор тока (ко вторичной обмотке измерительного электромагнитного трансформатора подключается источник тока, при подаче тока по первичной обмотке будет протекать увеличенное в коэффициент преобразования раз значение тока).

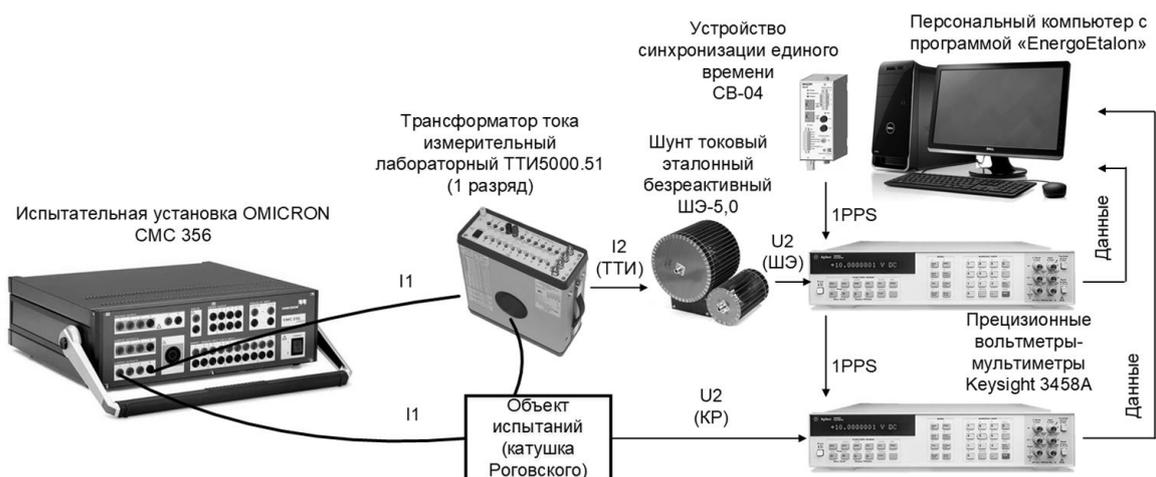


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Эталонный измерительный канал образован лабораторным трансформатором 1 разряда ТТИ5000.51 (класс точности 0,01) и безреактивным шунтом ШЭ-5,0 (класс точности 0,05). Объект испытаний и безреактивный шунт подключаются к прецизионным вольтметрам-мультиметрам Keysight 3458A, выполняющим оцифровку напряжения и передачу данных в компьютер с программным обеспечением EnergoEtalon.

В программном обеспечении производится компарирование значений и вычисление погрешностей. Одновременное взятие выборок вольтметрами-мультиметрами обеспечивается за счет их синхронизации по сигналу 1PPS, подаваемому от сервера времени СВ-04.

Определение погрешностей преобразования тока катушками Роговского выполнялось до тепловых испытаний; после воздействия отрицательной температуры (минус 60 °С) и выдержки объекта испытаний при температуре 20 °С в течение 1 часа; после воздействия положительной температуры (плюс 70 °С) и выдержки объекта испытаний при температуре 20 °С в течение 1 часа. Воздействие положительными и отрицательными температурами на объект испытаний создавалось в камере теплехолода КТХ-74-75/180.

Исследования первого образца катушки Роговского с сердечником из капролона, установленного в цифровом трансформаторе тока и напряжения, под воздействием высокой положительной температуры показали существенное изменение амплитудной погрешности (табл. 1) до 1,2 %, что превышает требования класса точности 5P.

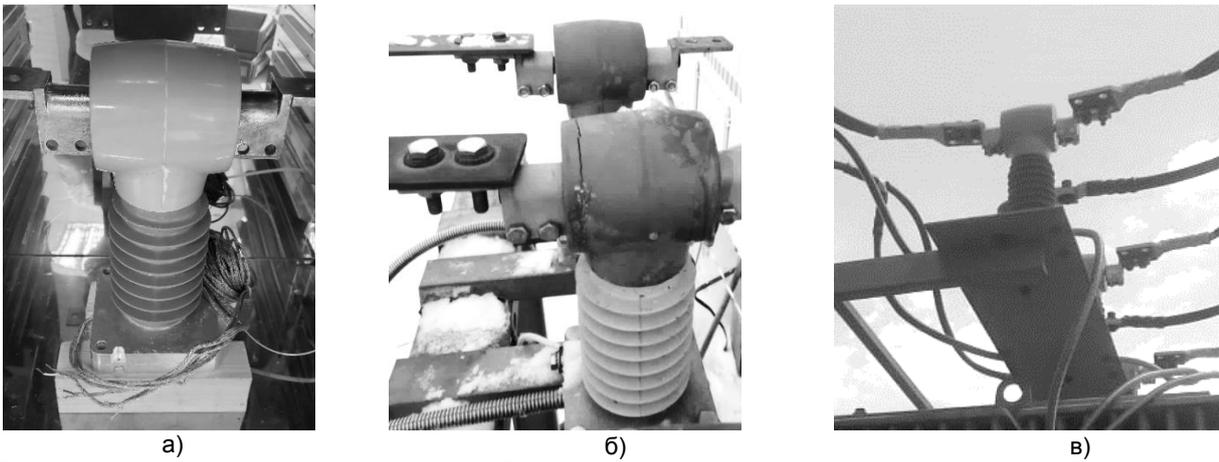
После второго цикла нагрева произошло повреждение первичного преобразователя цифрового трансформатора, что аналогично ситуации, возникшей в процессе первой опытной эксплуатации (рис. 5, а).

После проведенных экспериментов была усилена конструкция комбинированного преобразователя тока и напряжения цифрового трансформатора, а также изменены используемые материалы (силиконовые компаунды с меньшим линейным расширением). Испытания пятью циклами нагрева и охлаждения нового первичного преобразователя (рис. 5,в) подтвердили его устойчивость к воздействию низких и высоких температур. Кроме того, опытная промышленная эксплуатация нового преобразователя цифрового трансформатора на нескольких энергообъектах в разных климатических зонах России (рис. 5,в) подтвердила сделанные выводы.

В целях выбора материала сердечника катушки Роговского, при котором воздействие высоких и низких температур (климатическое исполнение УХЛ) не приводит к существенному изменению погрешности преобразователя, были проведены испытания трех образцов, сердечник которых выполнен из материалов с низким коэффициентом линейного расширения. Новые образцы, в отличие от предыдущих, были пропитаны специализированным компаундом для обеспечения механической прочности и изменения витка катушки Роговского только при расширении или сжатии сердечника. Выполненные исследования при пяти циклах тепловых воздействий (рис. 6) показали, что изменение погрешности не превышает 0,2% при номинальном токе (соответствует классам точности 0,5S и 5P).

Таблица 1. Погрешности преобразования тока катушкой Роговского при номинальном токе

Условия определения погрешностей	δA , %	Δt_p , мин
До начала тепловых исследований	-0,006	-0,11
После охлаждения до -60 °С (1 цикл)	-0,048	-0,02
После нагрева до +70 °С (1 цикл)	-1,209	-0,23
После охлаждения до -60 °С (2 цикл)	-1,052	-0,20
После нагрева до +70 °С (2 цикл)	1,942	-49,72



а) б) в)

Рис. 5. Новая конструкция первичного преобразователя тока и напряжения цифрового трансформатора и ее испытания в лабораторных условиях (а) и на энергообъекте (б, в)

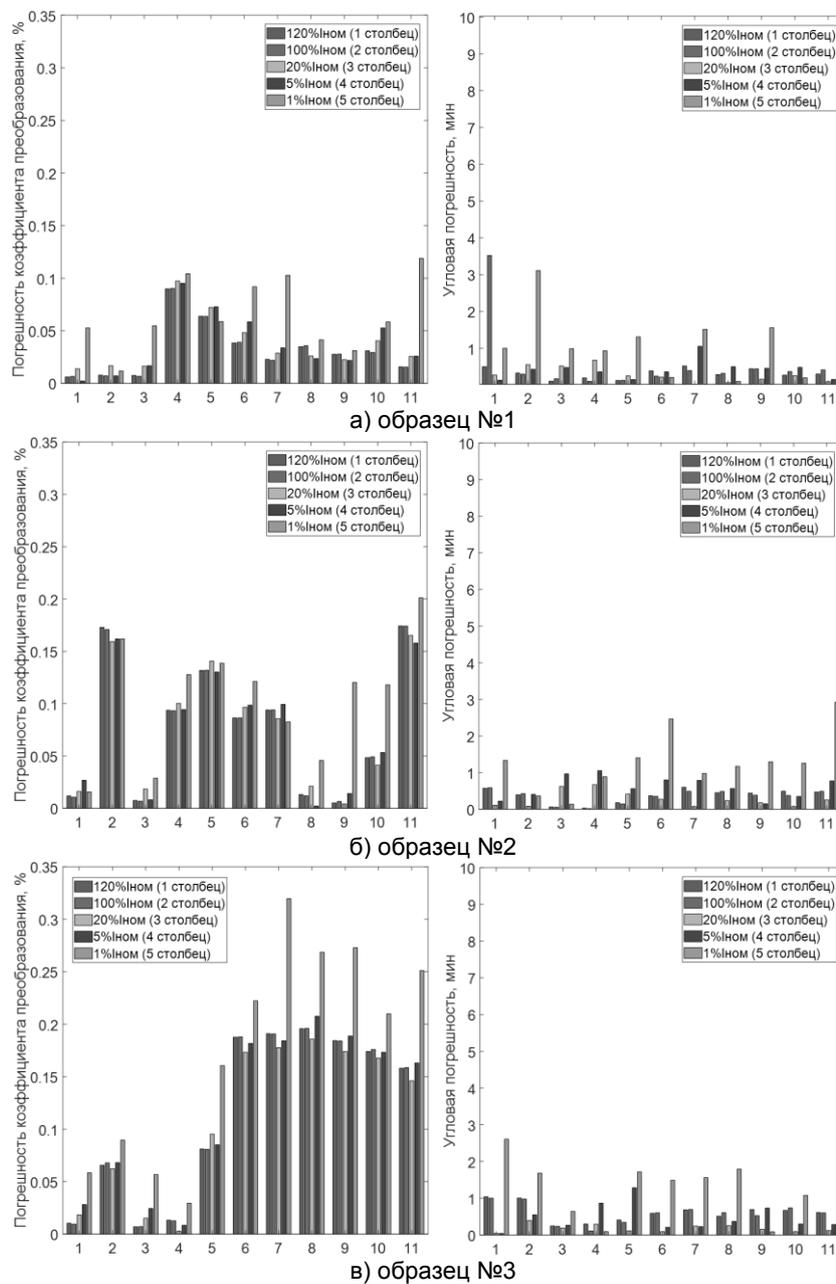
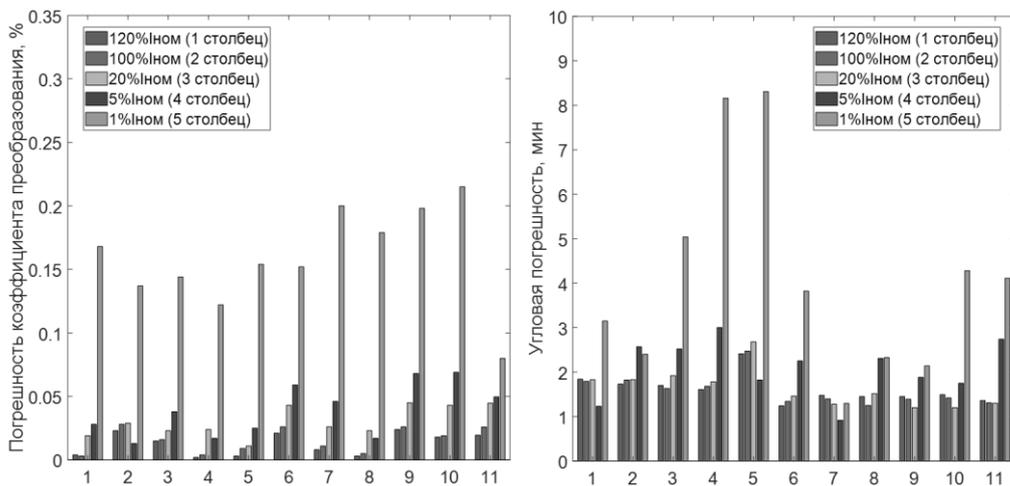


Рис. 6. Погрешности катушек Роговского с сердечниками из материалов с низким температурным коэффициентом расширения: 1 – до нагрева и охлаждения; 2, 4, 6, 8, 10 – после нагрева до плюс 70 °С; 3, 5, 7, 9, 11 – после охлаждения до минус 60 °С

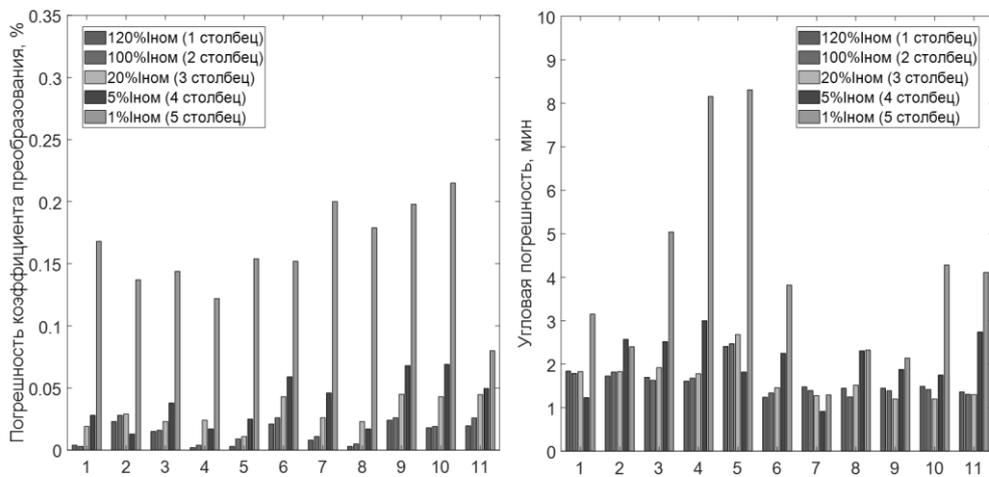
Аналогичные выводы были сделаны при исследовании катушек Роговского с новыми сердечниками и малогабаритных электромагнитных трансформаторов в составе первичного комбинированного преобразователя тока и напряжения (рис. 7).

Цифровые комбинированные трансформаторы тока и напряжения с катушками Роговского новой конструкции успешно прошли опытно-промышленную эксплуатацию в течение

двух лет. Результаты их первичной и повторной (после двух лет опытной эксплуатации) проверок представлены в табл. 2. Результаты испытаний подтверждают высокую точность измерений разработанного первичного преобразователя на базе КР. При этом можно отметить, что КР может быть использована как для коммерческого учета электроэнергии (класс точности 0.2S), так и для релейной защиты и автоматики (класс точности 5P).



а) малогабаритный электромагнитный трансформатор тока



б) катушка Роговского

Рис. 7. Погрешности первичных преобразователей тока в составе цифрового трансформатора

Таблица 2. Метрологические характеристики ЦТТ на базе КР до и после 2 лет опытной эксплуатации

Ток, А	Ток $I_{ном}$, %	Фаза А				Фаза В				Фаза С			
		δI , %		$\Delta\phi$, мин		δI , %		$\Delta\phi$, мин		δI , %		$\Delta\phi$, мин	
		Перв.	Повт.	Перв.	Повт.	Перв.	Повт.	Перв.	Повт.	Перв.	Повт.	Перв.	Повт.
900	120	0,05	0,04	-0,3	-5,6	0,07	0,09	-0,2	-5,5	0,08	0,07	-0,04	-4,9
600	100	0,05	0,04	-0,5	-6,4	0,06	0,09	-0,2	-4,4	0,09	0,13	-0,06	-3,4
120	20	0,05	0,09	-0,6	-4,8	0,08	0,11	-0,2	-5,7	0,10	0,14	-0,04	-4,6
30	5	0,04	0,27	-5,0	-3,4	0,09	0,30	-2,0	-4,3	0,09	0,33	-2,00	-6,3
6	1	0,03	0,55	-20,0	-17,4	0,06	0,63	-7,3	3,3	0,03	0,68	-10,00	-7,0

Заключение. Катушка Роговского является относительно новым преобразователем для электроэнергетических объектов, обладающим множеством преимуществ по сравнению с электромагнитными трансформаторами тока. Однако поведение данного преобразователя мало изучено в части его применения в реальных условиях эксплуатации энергообъектов. Выполненные исследования показывают, что для достижения высокой точности преобразователя в широком температурном диапазоне необходимо использовать материалы с низким коэффициентом линейного расширения. Под воздействием температуры сердечники из таких материалов несущественно изменяют форму и величину витка катушки Роговского.

Список литературы

1. **Красовский П.Ю.** Погрешность информационно-измерительных систем и влияющие на них факторы // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2012. – Вып. 77. – С. 119–122.
2. **Mason Russell C.** The art & science of protective relaying [Электронный ресурс]. – 346 с. – Режим доступа: www.gedigitalenergy.com/multilin/notes/artsci/artsci.pdf
3. **Гуртовцев А.** Измерительные трансформаторы тока. Проблема нижней границы вторичной нагрузки // Новости электротехники. – 2008. – № 2.
4. **Раскулов Р.Ф.** Погрешности трансформаторов тока. Влияние токов короткого замыкания // Новости электротехники. – 2005. – № 2(32).
5. **Раскулов Р.Ф.** Анализ условий работы измерительных трансформаторов и исследование влияний воздействующих факторов на точностные характеристики трансформаторов в энергосистемах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004. – 24 с.
6. **Кожович Л.А., Бишоп М.Т.** Современная релейная защита с датчиками тока на базе катушки Роговского // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – М., 2010. – С. 39–49.
7. **Гуревич В.** Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч. 2 // Компоненты и технологии. – 2010. – № 3.
8. **Measures to reduce electromagnetic interferences on substation secondary circuit / Z. Bajramovic, I. Turkovic., A. Mujezinovic, et al.** // Proceedings of ELMAR. – 2012. – P. 129–132.
9. **Rogowski W., Steinhaus W.** Die Messung der magnetischen Spannung // Archiv fur Elektrotechnik. – 1912. – С. 141–150.
10. **Шваб А.** Измерения на высоком напряжении. Измерительные приборы и способы измерения: пер. с нем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
11. **A Review of Traditional Helical to Recent Miniaturized Printed-Circuit-Board Rogowski Coils for Power Electronic Applications / Yafei Shi, Zhen Xin, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg.** DOI: 10.1109/TPEL.2020.2984055.
12. **Koon W.** Current sensing for energy metering // IIC-China Conference Proc. – Shanghai, China, 2022. – P. 321–324.
13. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А., Нестерихин А.Е.** Исследование погрешностей измерения тока поясом Роговского на основе математического и физического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 1–6.
14. **The Rogowski Coil Sensor in High Current Application: A Review / Ayob Nazmy Nanyan, Muzamir Isa, Haziah Abdul Hamid, Mohamad Nur Khairul Hafizi Rohani, Baharuddin Ismail // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.** – 2018. – № 318.
15. **A Novel Transient Fault Current Sensor Based on the PCB Rogowski Coil for Overhead Transmission Lines / Yadong Liu, Xiaolei Xie, Yue Hu, et al. // Sensors.** – 2016. – № 16.
16. **A Review on the Rogowski Coil Principles and Applications / M.H. Samimi, A. Mahari, M. Ali Farahnakian, H. Mohseni // IEEE Sensors Journal.** – 2014, October. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2362940.
17. **Ковнерев М., Троицкий Ю.** Использование катушки Роговского для токовых измерений // Элементная база: пассивные компоненты. – 2005. – № 5. – С. 123–127.
18. **Вавин В.Н.** Трансформаторы тока. – М.: Л.: Изд-во «Энергия», 1966. – 104 с.
19. **Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др.** – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с.
20. **Schillmann E.** Der Hallgenerator, ein neuartiges Bauelement der Elektrotechnik // Tech. Rundsch. – 1957. – No. 42. – P. 9–13
21. **Hartel W.** Anwendung von Hallgeneratoren // SiemensZ. – 1954. – No. 28. – P. 376–384.
22. **Kuhrt F.** Eigenschaften und Anwendungen der Hallgeneratoren // VDE-Fachberichte. – 1956. – No. 19.
23. **Глухов О.А., Глухов Д.О.** Расчет параметров индукционного датчика тока на базе катушки Роговского // Проблемы энергетики. – 2015. – № 3–4. – С. 124–131.
24. **Любомир К.** Катушки Роговского – реальная альтернатива традиционным ТТ [Электронный ресурс] // Цифровая подстанция. – Режим доступа: <https://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/>
25. **Kojovic L.A., Beresh R.** Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying // IEEE PSRC Spec. Rep. – 2010, September. – P. 1–72.
26. **Тюрпен П.** Новый класс датчиков переменного тока на основе катушек Роговского // Электронные компоненты. – 2010. – № 12. – С. 37–39.
27. **Клайбер Б., Турпин П.** Как выбирать и применять датчики тока для высокопроизводительных и экономичных систем контроля мощности // Силовая электроника. Силовая элементная база. – 2015. – № 3. – С. 34–38.
28. **Суворов А.А., Глазырин В.Е., Ерушин В.П.** Производственные испытания дифференциальной защиты трансформатора с поясами Роговского // Горная промышленность. – 2012. – № 3. – С. 90.
29. **Обыденнов Е.** Применение датчиков тока Pulse Electronics на основе катушки Роговского с семейством специализированных STPMxx интегральных микросхем в аппаратуре учета энергоресурсов // Вестник электроники. – 2012. – № 1(33). – С. 32–36.
30. **Кувшинов Г.Е., Михайленко О.С.** Катушка Роговского для измерения больших токов в

устройствах защиты и автоматики // Автоматика, электроника и средства связи. – 2012. – С. 257–258.

31. **Ward D.A., Exon J., La T.** Using Rogowski coils for transient current measurements // Engineering science and education journal. – 1993, June. – P. 105–113.

32. **Shepard D.E., Yauch D.W.** An overview of rogowski coil current sensing technology. – Grove City, Ohio, 2000. – 12 p.

References

1. Krasovskiy, P.Yu. Pogreshnost' informatsionno-izmeritel'nykh sistem i vliyayushchie na nikh faktory [Inaccuracy of information-measuring systems and factors influencing them]. *Gornya elektromekhanika i avtomatika*, 2012, issue 77, pp. 119–122.

2. Mason Russell, C. *The art & science of protective relaying*. 346 p. Available at: www.gedigitalenergy.com/multilin/notes/artsci/artsci.pdf.

3. Gurtovtsev, A. Izmeritel'nye transformatory toka. Problema nizhney granitsy vtorichnoy nagruzki [Measuring current transformers. The problem of the lower boundary of the secondary load]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, no. 2. Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2008/50/25_.php.

4. Raskulov, R.F. Pogreshnosti transformatorov toka. Vliyaniye tokov korotkogo замыкaniya [Errors of current transformers. Influence of short-circuit currents]. *Novosti elektrotehniki*, 2005, no. 2(32).

5. Raskulov, R.F. *Analiz usloviy raboty izmeritel'nykh transformatorov i issledovanie vliyaniy vozdeystviyushchikh faktorov na tochnostnye kharakteristiki transformatorov v energosistemakh*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Analysis of the operating conditions of measuring transformers and the study of the influence of affecting factors on the accuracy characteristics of transformers in power systems. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2004. 24 p.

6. Kozhovich, L.A., Bishop, M.T. Sovremennaya reley'naya zashchita s datchikami toka na baze katushki Rogovskogo [Modern relay protection with current sensors based on the Rogowski coil]. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem reley'noy zashchity i avtomatiki energosistem» [Collection of reports of the International scientific and technical conference "Sovremennye napravleniya razvitiya sistem reley'noi zashchity i avtomatiki energosystem"]. Moscow, 2010, pp. 39–49.

7. Gurevich, V. Problema elektromagnitnykh vozdeystviy na mikroprotssornye ustroystva reley'noy zashchity. Ch. 2 [The problem of electromagnetic influences on microprocessor relay protection devices. Part 2]. *Komponenty i tekhnologii*, 2010, no. 3. Available at: www.kit-e.ru/articles/powerel/2010_03_91.php.

8. Bajramovic, Z., Turkovic, I., Mujezinovic, A., Carsimamovic, A., Muharemovic, A. Measures to reduce electromagnetic interferences on substation secondary circuit. *Proceedings of ELMAR*, 2012, pp. 129–132.

9. Rogowski, W., Steinhaus, W. Die Messung der magnetischen Spannung. *Archiv fur Elektrotechnik*, 1912, pp. 141–150. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF01656479>.

10. Shvab, A. *Izmereniya na vysokom napryazhenii: Izmeritel'nye pribory i sposoby izmereniya* [High voltage measurements: Measuring devices and methods of measurement]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 264 p.

11. Shi, Y., Xin, Z., Loh, P.C., Blaabjerg, F. A Review of Traditional Helical to Recent Miniaturized Printed Circuit Board Rogowski Coils for Power-Electronic Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Nov. 2020, vol. 35, no. 11, pp. 12207–12222. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2984055.

12. Koon, W. Current sensing for energy metering. International IC – China (IIC-China) Conference and Exhibition and the Embedded Systems Conferences – China (ESC-China). Shanghai, 2002, pp. 321–324.

13. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Nesterikhin, A.E. Issledovanie pogreshnostey izmereniya toka poyasom Rogovskogo na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya [Investigation of errors in current measurement by a Rogowski coil based on mathematical and physical modeling]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 1–6.

14. Nazmy Nanyan, A., Isa, M., Hamid, H. A., Nur Khairul Hafizi Rohani, M., Ismail, B. The Rogowski Coil Sensor in High Current Application: A Review. *Materials Science and Engineering Conference Series*, 2018, vol. 318, no. 1, p. 012054. DOI:10.1088/1757-899X/318/1/012054.

15. Liu, Y., Xie, X., Hu, Y., Qian, Y., Sheng, G., Jiang, X. A Novel Transient Fault Current Sensor Based on the PCB Rogowski Coil for Overhead Transmission Lines. *Sensors*, May 2016, vol. 16, no. 5, p. 742.

16. Samimi, M.H., Mahari, A., Farahnakian, M.A., Mohseni, H. The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review. *IEEE Sensors Journal*, October 2014, vol. 15, no. 2, pp. 651–658. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2362940.

17. Kovnerev, M., Troitskiy, Yu. Ispol'zovanie katushki Rogovskogo dlya tokovykh izmereniy [Use of the Rogowski coil for current measurements]. *Elementnaya baza: passivnye komponenty*, 2005, no. 5, pp. 123–127.

18. Vavin, V.N. *Transformatory toka* [Current Transformers]. Moscow: Izdatel'stvo «Energiya», 1966. 104 p.

19. Afanasiev, V.V., Adoniev, N.M., Kibel, V.M., Sirota, I.M., Stogniy, B.S. *Transformatory toka* [Current Transformers]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdeleniye, 1989. 416 p.

20. Schillmann, E. Der Hallgenerator, ein neuartiges Bauelement der Elektrotechnik. *Tech. Rundsch*, 1957, no. 42, pp. 9–13.

21. Hartel, W. Anwendung von Hallgeneratoren. *Siemens-Z*, 1954, no. 28, pp. 376–384.

22. Kuhrt, F. Eigenschaften und Anwendungen der Hallgeneratoren. *VDE-Fachberichte*, 1956, no. 19.

23. Glukhov, O.A., Glukhov, D.O. Raschet parametrov induktsionnogo datchika toka na baze katushki Rogovskogo [Calculation of the parameters of an inductive current sensor based on a Rogowski coil]. *Problemy Energetiki*, 2015, no. 3–4, pp. 124–131.

24. Lyubomir, K. Katushki Rogovskogo – real'naya alternativa traditsionnym TT [Rogowski coils – a real alternative to traditional CTs]. *Tsifrovaya podstantsiya*. Available at: <https://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/>

25. Kojovic, L.A., Beresh, R. Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying. *IEEE PSRC Spec. Rep.*, September 2010, pp. 1–72.

26. Tyurpen, P. Novyy klass datchikov peremennogo toka na osnove katushek Rogovskogo [A new class of AC sensors based on Rogowski coils]. *Electronnye Komponenty*, 2010, no. 12, pp. 37–39.

27. Klayber, B., Turpin, P. Kak vybirat' i primenyat' datchiki toka dlya vysokoproizvoditel'nykh i ekonomichnykh sistem kontrolya moshchnosti [How to choose and apply current sensors for high-performance and economical power control systems]. *Silovaya elektronika. Silovaya elementnaya baza*, 2015, no. 3, pp. 34–38.

28. Suvorov, A.A., Glazyrin, V.E., Erushin, V.P. Proizvodstvennyye ispytaniya differentsial'noy zashchity transformatora s poyasami rogovskogo [Industrial testing of the differential protection of a transformer with Rogowski coils]. *Gornaya Promyshlennost'*, 2012, no. 3, p. 90.

29. Obydenov, E. Primenenie datchikov toka Pulse Electronics na osnove katushki Rogovskogo s

semeystvom spetsializirovannykh STPMxx integral'nykh mikroskhem v apparature ucheta energoresursov [Application of Pulse Electronics current sensors based on a Rogowski coil with a family of specialized STPMxx integrated circuits in energy metering equipment]. *Vestnik elektroniki*, 2012, no. 1(33), pp. 32–36.

30. Kuvshinov, G.E., Mikhaylenko, O.S. Katushka Rogovskogo dlya izmereniya bol'shikh tokov v ustroystvakh zashchity i avtomatiki [Rogowski coil for measuring high currents in protection and automation devices]. *Avtomatika, elektronika i sredstva svyazi*, 2012, pp. 257–258.

31. Ward, D.A., Exon, J.T. Using Rogowsky coils for transient current measurements. *Engineering science and education journal*, June 1993, pp. 105–113.

32. Shepard, D.E., Yauch, D.W. An overview of rogowski coil current sensing technology. Grove City, Ohio, 2000. 12 p.

УДК [621.314.26+621.316.94+621.317.757]:621.311.1

Александр Аркадьевич Николаев

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

Максим Юрьевич Афанасьев

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: m.afanasiev@magtu.ru

Ильдар Галиевич Гилемов

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

Михаил Викторович Буланов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станов с использованием преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. За последние годы преобразователи частоты с активными выпрямителями получили большое распространение ввиду своих преимуществ, таких как: возможность рекуперации энергии в тормозных режимах электропривода и поддержка заданного значения коэффициента мощности на входе активного выпрямителя. При этом данные преобразователи обладают существенным недостатком, заключающимся в ухудшении качества напряжения во внутризаводской распределительной электрической сети 6–35 кВ из-за наложения высокочастотных гармоник входного напряжения и тока активного выпрямителя на резонансные области частотной характеристики питающей сети. Данный недостаток можно устранить за счет использования во внутризаводских электрических сетях специализированных пассивных фильтров, обеспечивающих смещение основного резонанса токов в зону, свободную от высокочастотных гармоник преобразователя частоты с активным выпрямителем. Это позволяет снизить коэффициент гармонических искажений напряжения на секциях главной понизительной подстанции предприятия.

Материалы и методы. Обработка экспериментальных данных осуществлена в математическом пакете Matlab с приложением Simulink, где с помощью данных, полученных на действующем металлургическом комплексе ЧерМК ПАО «Северсталь», осуществлен анализ качества напряжения сети 10 кВ с использованием специализированных пассивных фильтров и без них.

Результаты. Приведены результаты исследования эффективности применения специализированных пассивных фильтров в системе внутризаводского электроснабжения прокатного комплекса, функционирующего на ЧерМК ПАО «Северсталь». Проведены исследования причин ухудшения качества напряжения в распределительной сети 10 кВ и, как следствие, нарушения режимов работы чувствительных электроприемников. Разработана комплексная математическая модель сети 10 кВ для исследования способа улучшения гармонического состава напряжения за счет установки специализированного пассивного фильтра, позволяющего корректировать частотную характеристику сети 10 кВ, смещать ее в область, свободную от высокочастотных гармоник, генерируемых современными преобразователями частоты с активными выпрямителями. Таким образом, исключается резонанс токов и напряжений на секциях 10 кВ, и, как следствие, наблюдается значительное улучшение формы линейного напряжения, уменьшение коэффициента гармонического искажения напряжения K_U более чем на 75,2–91,2 % (до значений $K_U = 0,49–1,4$ %).

Выводы. На основе полученных результатов рекомендовано использование специализированного пассивного фильтра в целях исключения негативного влияния резонансных явлений. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем электроснабжения металлургических предприятий, имеющих в своем составе мощные электроприводы с активными выпрямителями.

Ключевые слова: преобразователь частоты, активный выпрямитель, высшие гармоники, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость, резонанс токов, специализированный пассивный фильтр

¹ Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-19-20069).
The project is supported by the Grant of the Russian Research Foundation (project no. 22-19-20069).

Alexander Arkadyevich Nikolaev

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

Maxim Yuryevich Afanasyev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Postgraduate student of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: m.afanasiev@magtu.ru

Il'dar Galievich Gilemov

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

Mikhail Viktorovich Bulanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Postgraduate student of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Improvement of power quality in power supply systems of rolling mills using frequency converters with active rectifiers due to use of specialized passive filters

Abstract

Background. In recent years, the frequency converters (FC) with active rectifiers (AR) have become widespread due to their advantages. The advantages are the possibility of energy recovery in braking modes of electric drive and support of the set value of power factor at the input of AR. At the same time these converters have a significant disadvantage, that is the deterioration of voltage quality in the in-plant 6–35 kV power distribution network due to the imposition of high-frequency harmonics of the input voltage and current of AR on the resonant area of the supply network frequency response. This disadvantage can be eliminated by using special passive filters in the in-plant power networks. They ensure the shift of the main resonance of currents to a zone free from high-frequency harmonics of the FC with AR. It makes possible to reduce the harmonic distortion coefficient in the voltage sections of the main stepdown substation (MSS) of the enterprise.

Materials and methods. Processing of experimental data is carried out in the Matlab mathematical package with the Simulink application. Using income data of functioning metallurgical complex CherMK of PJSC “Severstal”, the authors carried out the analysis of voltage quality of 10 kV network using specialized passive filters and without them.

Results. The article presents the results of the study of the effectiveness of the use of specialized passive filters in the in-plant power supply system of the rolling complex operating at the CherMK of PJSC “Severstal”. The reasons of the deterioration of the voltage quality in the 10 kV distribution network are studied, and as a result, operational breakdown of the modes of sensitive electrical receivers. A complex mathematical model of the 10 kV network has been developed to study the way to improve the harmonic composition of voltage due to installation of specialized passive filters. This filter allows you to adjust the frequency characteristics of the 10 kV network, shift it to an area free of high-frequency harmonics generated by modern frequency converters with active rectifiers. Thus, the resonance of currents and voltages in 10 kV sections is eliminated. As a result, a significant improvement in the shape of the line voltage and a decrease in the harmonic distortion coefficient of voltage $THD_U = 75,2-91,2\%$ to values $THD_U = 0,49-1,4\%$ is observed.

Conclusions. The main result of the research is the recommendation to use a specialized passive filter to eliminate the negative impact of the harmonic component of the current resonance. The research results can be used to design power supply systems of metallurgical enterprises that have powerful electric drives with active rectifiers.

Key words: frequency converter, active rectifier, higher harmonics, power quality index, electromagnetic compatibility, current resonance, specialized passive filter (SPF)

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052

Введение. Современные мощные электроприводы промышленных механизмов, например электроприводы прокатных станов металлургических предприятий, внедряемые в производство в течение последнего десятилетия, как правило, построены на базе многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ) среднего напряжения и асинхронных (синхронных) двигателей. Данный класс силовых преобразователей имеет ряд преимуществ перед преобразователями частоты предыдущего поколения, имеющих диодные или тиристорные выпрями-

тельные модули [1–4]. Данные преимущества привели к массовому внедрению на промышленных предприятиях мощных электроприводов на базе ПЧ с АВ. Однако, как показал опыт эксплуатации данных силовых преобразователей, ПЧ с АВ обладают недостатками, из которых необходимо выделить два наиболее существенных: 1) высокая вероятность сильного ухудшения качества напряжения во внутризаводской распределительной электрической сети 6–35 кВ из-за наложения высокочастотных гармоник входного напряжения и тока АВ на резонансные области частотной характери-

ки питающей сети; 2) высокая чувствительность ПЧ с АВ к провалам и несимметрии напряжения со стороны питающей сети [5, 6].

Как показали проведенные исследования, на многих металлургических предприятиях России и зарубежья имеют место серьезные проблемы с надежностью функционирования систем автоматизированного электропривода на базе ПЧ с АВ, а также проблемы с обеспечением электромагнитной совместимости ПЧ с АВ с внутриводской сетью 6–35 кВ. Так, например, на ряде металлургических предприятий России, например на АО «Металлургический завод Балаково» (г. Балаково, Саратовская область), Череповецкий металлургический комбинат ПАО «Северсталь» (г. Череповец, Вологодская область) и др., из-за сильных искажений напряжения в распределительной сети 10 кВ наблюдались проблемы с функционированием электрооборудования, а также выходы из строя преобразователей частоты, функционирующих параллельно мощным источникам гармоник высокого порядка – ПЧ с АВ в составе главных электроприводов прокатных станов.

Зачастую применение традиционных односторонних фильтров не всегда позволяет решить проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за широкого диапазона значимых гармоник, особенно в среднечастотном и высокочастотном диапазонах. Установка традиционных фильтров сопровождается дополнительными паразитными резонансами тока, которые усиливают промежуточные гармоники. Данные гармоники многократно усиливают колебания и сильно искажают форму напряжения при наложении частотной характеристики распределительной сети на область высокочастотных гармоник, генерируемых современными ПЧ с АВ. В ходе проведенных ранее исследований [7] был предложен новый способ обеспечения ЭМС за счет использования специализированных пассивных фильтров (СПФ). Данное устройство способно воздействовать на гармоники в широком частотном диапазоне, и его главной задачей является сдвиг частотной характеристики сети в безопасную область, где отсутствуют значимые гармоники, генерируемые современными ПЧ с АВ, чтобы избежать резонанса токов и улучшить ЭМС распределительной сети с мощными приводами с ПЧ с АВ [8].

Также стоит отметить, что проблема ЭМС мощных электроприводов на базе ПЧ с АВ решается путем усовершенствованных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), обеспечивающих исключение гармонических составляющих в области расположения резонанса токов частотной характеристики. Следует

отметить, что в определенных случаях изменение алгоритмов ШИМ невозможно или затруднено в связи с закрытостью систем управления АВ, поэтому иным способом является использование СПФ, вопросы применения которых рассмотрены в [9].

Методы исследования. Исследование применения СПФ проводилось на примере системы электроснабжения четырехклетьевого стана холодной прокатки ППП ХП, функционирующей на ЧерМК ПАО «Северсталь».

Упрощенная схема электроснабжения электроприемников ГПП-2 приведена на рис. 1, где предусмотрено два сетевых трансформатора 110/10 кВ 1Т и 2Т 63 МВА, осуществляющих питание двух секций РУ-10 кВ. В зависимости от выбранной схемы электроснабжения (раздельная или совместная работа секций 1 и 2) выбирается состояние секционного выключателя СМВ-1. От секций 1 и 2 РУ-10 кВ ГПП-2 по кабельным линиям получают питание распределительные устройства РУ-10 кВ следующих цеховых подстанций: 1) ПС -13 (КТГ 6, 7, 8, питание вспомогательных механизмов и контроллеров четырехклетьевого стана); 2) РП-19 (главные электроприводы четырехклетьевого стана); 3) РП-33 (газокислородный цех); 4) ПС-54А (цех водоснабжения); 5) ПС-56 (цех водоснабжения); 6) РП-91 (цех покрытий металла №2 АНГЦ), РП-92 (цех покрытий металла №3 АНГЦ); 7) РП-101 (участок подготовки защитных газов); 8) РП-103 (газокислородный цех); 9) РП-155 (цех покрытий металла №1 АНГЦ); 10) РП-214 (ЛПЦ-1); 11) РП-220 (цех травления металла агрегата травления), а также вспомогательные КТП.

В распределительной сети 10 кВ района ГПП-2 отсутствуют устройства компенсации реактивной мощности и фильтрокомпенсирующие устройства. От 1 и 2 секций РП-19 получают питание электроприводы четырех клеток мощностью 12 МВт и натяжной моталки мощностью 4,8 МВт с приводными синхронными двигателями. Согласующие понизительные трансформаторы Т1-Т5 10/3,165 кВ (10/3,165/3.165 кВ) осуществляют питание трехуровневых ПЧ с АВ среднего напряжения ACS6000 производства фирмы АВВ, выполненных по двухзвенной схеме (выпрямитель/инвертор). Трансформаторы Т2, Т3, Т4 являются трехобмоточными, со сдвигом фаз на вторичных обмотках 0° и 30°, необходимым для реализации двенадцатипульсовой схемы выпрямления. Трансформаторы Т1 и Т5 имеют по одной вторичной обмотке для питания ПЧ с АВ с шестипульсовой схемой выпрямления [10–12].

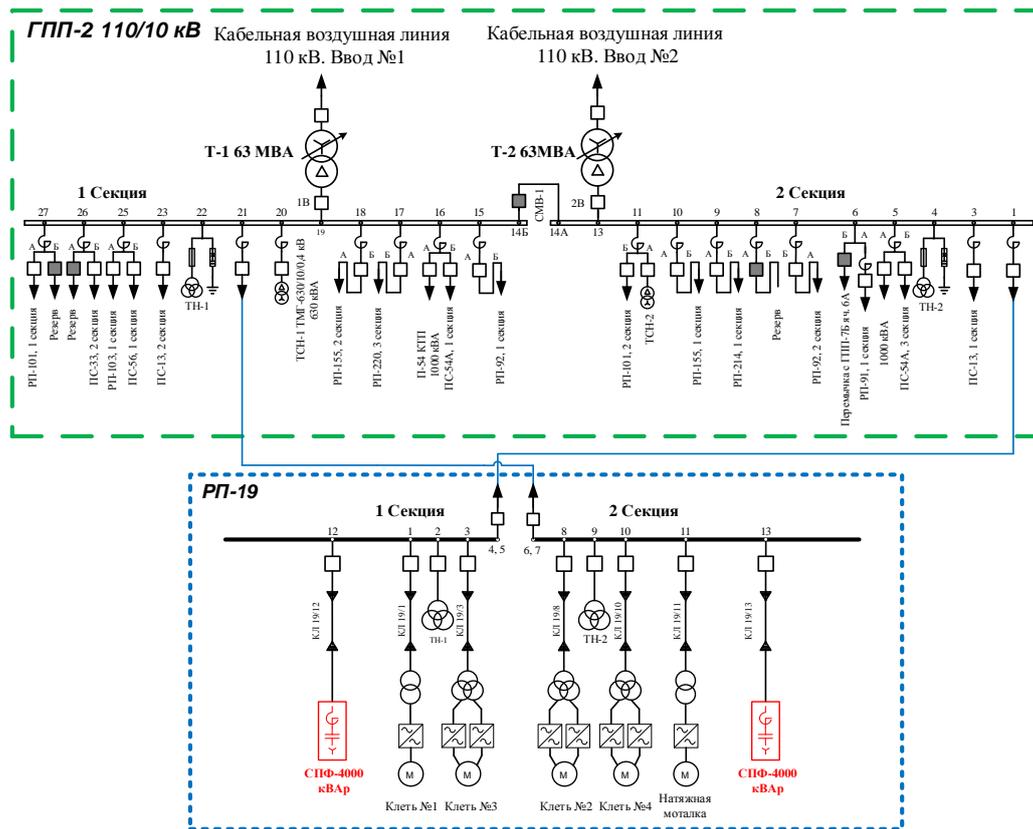


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема сети 10 кВ района ГПП-2 с указанием точек установки дополнительных СПФ в РУ-10 кВ РП-19 для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ

Отдельные участки распределительной сети 10 кВ, образованные отходящими от ГПП-2 и последующих цеховых РП кабельными линиями, при взаимодействии с индуктивностями сетевых трансформаторов 110/10 кВ и токоограничивающих реакторов в ячейках РУ-10 кВ ГПП-2 создают сложную картину резонансных явлений в частотных характеристиках сети 10 кВ $Z_{\text{СЕТИ}}(f)$ относительно секций 1 и 2 РУ-10 кВ ГПП-2 с несколькими экстремумами в области до 10 кГц. В частотной характеристике на секциях РП-19 также присутствуют резонансные явления в высокочастотной области, обусловленные взаимодействием между собственной емкостью и индуктивностью реакторов в ячейках 1, 21 ГПП-2 [13–15].

Для проведения дальнейших исследований на основании полученных данных была разработана комплексная математическая модель сети 10 кВ района ГПП-2 и главных электроприводов четырехклетьевого стана. Разработанная модель позволяет производить исследования качества электроэнергии при работе мощных ПЧ с АВ в сетях с резонансными явлениями при различных режимах электропитания и различных режимах работы ПЧ с АВ, а также при различных алгоритмах ШИМ АВ. Модель реализована с помощью математического пакета MATLAB Simulink и состоит из двух частей: модели системы электропитания ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» и модели главных электроприводов четырехклетьевого

стана ППП ХП. В данной модели учтены основные параметры системы электроснабжения завода, такие как: 1) параметры питающей сети 110 кВ на основании предоставленных значений токов трехфазного короткого замыкания в минимальном и максимальном режимах; 2) параметры сетевых трансформаторов 110/10 кВ 63 МВА; 3) параметры всех кабельных линий 10 кВ ГПП-2; 4) параметры электроприемников других цеховых РП и подстанций с упрощенным представлением в виде пассивных активно-индуктивных нагрузок с фиксированными параметрами, определенными на основании предоставленных суточных графиков изменения активной и реактивной мощностей, а также действующего значения тока. Были реализованы имитационные модели АВ электроприводов четырехклетьевого стана, состоящие из управляемых источников ЭДС, включенных последовательно с моделями пассивных трансформаторов Т1-Т5 10/3,165 кВ, учитывающих количество вторичных обмоток и их группу соединения, а также кабельных линий от РУ-10 кВ РП-19 до данных трансформаторов. Для адекватного анализа частотных характеристик при моделировании кабельных линий были использованы П-образные схемы замещения (одинарные П-секции) с учетом фактических значений активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей кабелей, определенных на основании марки, сечения и длины кабеля, а также числа

параллельных кабелей в одной фазе, указанных в кабельных журналах.

Подробное описание имитационной математической модели системы внутриводского электроснабжения прокатного комплекса, функционирующего на ЧерМК ПАО «Северсталь», и электроприводов с ПЧ-АВ для исследования качества напряжения на общих секциях заводской подстанции 6–35 кВ при наличии резонансных явлений в частотной характеристике сети 6–35 кВ приведено в [16].

Необходимо отметить, что упрощенная реализация модели системы управления АВ без использования контура регулирования напряжения в звене постоянного тока АВ является допустимой при условии незначительного изменения напряжения в сети 10 кВ (не более $\pm 5\%$), а также полученных экспериментальных значений токов на входе ПЧ с АВ на действующем металлургическом комплексе ЧерМК ПАО «Северсталь» для режимов холостого хода и работы под нагрузкой [17]. В этом случае имитационная модель может быть реализована на базе управляемых источников ЭДС без реализации детальной модели трехуровневого АВ с тиристорными ключами. Благодаря этому стала возможной реализация комплексной модели сети 10 кВ района ГПП-2 и электроприводов четырехклетьевого стана с приемлемой скоростью расчета и адекватностью.

В результате анализа качества напряжения в сети 10 кВ района ГПП-2 отмечено, что из-за вышеуказанных резонансных явлений имеют место сильные искажения напряжения при работе ПЧ с АВ ACS6000 на холостом ходу и под нагрузкой. Показано, что гармонический состав напряжения на секциях 1 и 2 ГПП-2, являющихся точками общего присоединения, является неприемлемым из-за высокого значения

суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, а также из-за наличия высоких n -х гармонических составляющих по отдельным гармоникам напряжения среднечастотного диапазона (рис. 2).

Для оценки адекватности разработанной модели было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными оциллограммами, снятыми на действующем производстве ЧерМК ПАО «Северсталь». Данная проверка является корректной, поскольку работа ПЧ с АВ является стационарным процессом, мало зависящим от внешних факторов. Проведенное сравнение экспериментальных и расчетных значений K_U показало отклонение не более 5%. Пример сравнения для секции 1 ГПП-2 при раздельной работе секций 1 и 2 ГПП-2 представлен на рис. 3.

Также для подтверждения адекватности результатов математического моделирования было проведено сопоставление расчетных и экспериментальных характеристик $Z_{СЕТИ(f)}$ (рис. 4). Экспериментальные частотные характеристики были получены путем деления значений амплитуд значимых гармоник напряжения на значимые гармоники тока с одинаковыми номерами. Амплитуды гармоник получены из проведенного анализа гармонического состава напряжений и токов. Сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных частотных характеристик (рис. 4) показывает их приемлемое соответствие, что дает возможность использовать полученную математическую модель для разработки мероприятий по исключению негативного влияния ПЧ с АВ ACS6000 в составе мощных электроприводов четырехклетьевого стана на качество напряжения сети 10 кВ района ГПП-2.

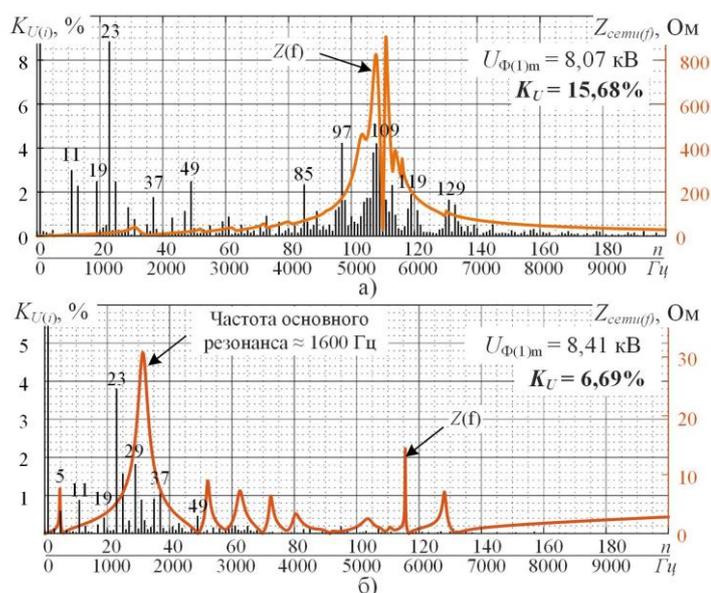


Рис. 2. Частотная характеристика и спектральный анализ напряжения на секциях РУ-10 кВ РП-19 (а) и секциях РУ-10 кВ ГПП-2 при совместной работе секций от Т2 (б)

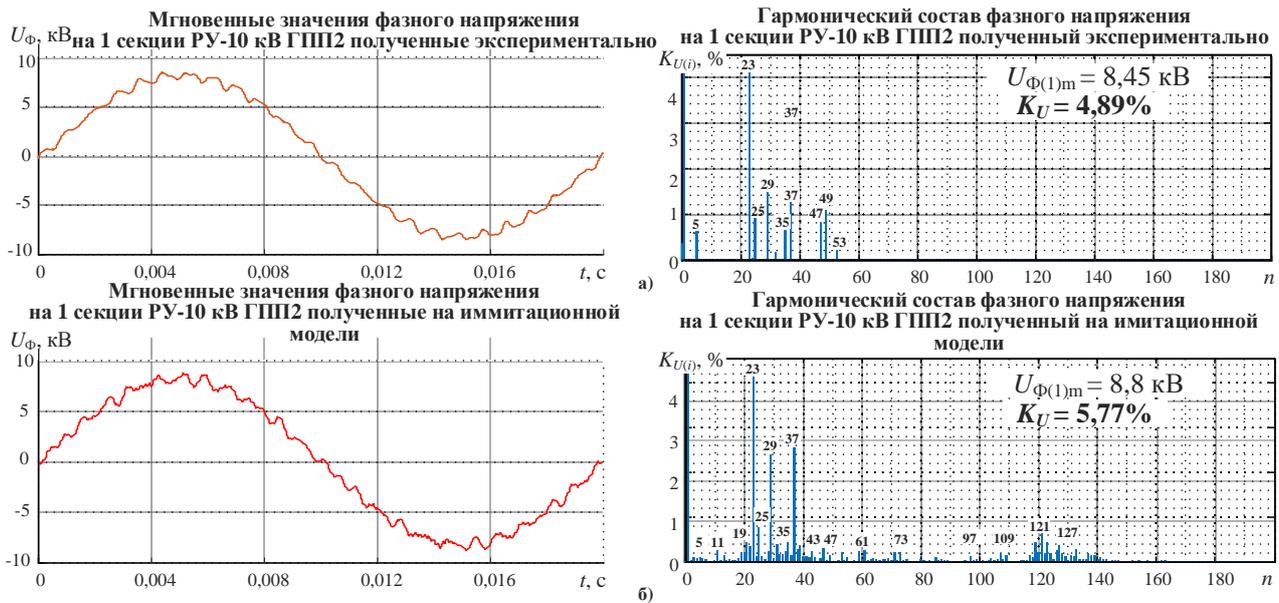


Рис. 3. Проверка адекватности разработанной модели: а – экспериментальные осциллограммы; б – осциллограммы, полученные на модели

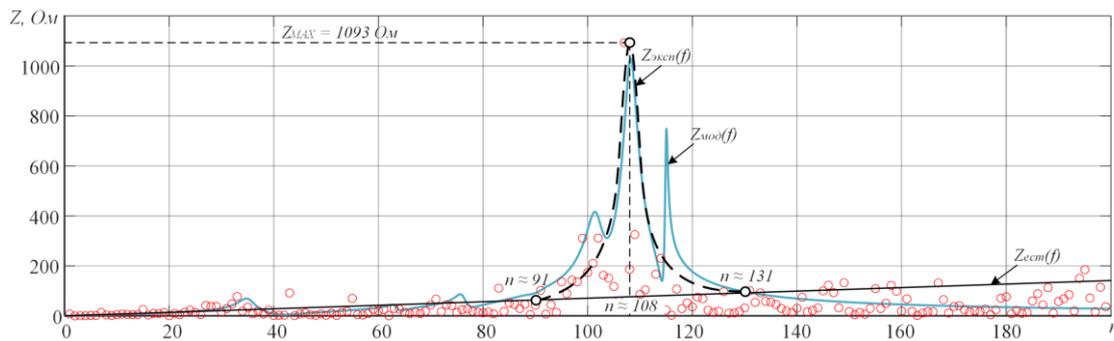


Рис. 4. Сравнение экспериментальной и расчетной частотных характеристик

Результаты исследования. Для улучшения гармонического состава напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 была предложена установка СПФ, обеспечивающих коррекцию частотных характеристик сети 10 кВ со сдвигом наиболее значимого резонанса тока в низкочастотный диапазон. Для обеспечения электромагнитной совместимости мощных электроприводов клетей сортового стана с сетью 10 кВ в системе электроснабжения предприятия были установлены СПФ, состоящие из конденсаторных батарей, соединенных в две параллельные звезды, и последовательно включенных воздушных реакторов с малой индуктивностью L_P (порядка 100 мкГн). Значение емкости C в составе СПФ выбирается таким образом, чтобы осуществить перемещение резонанса тока в частотной характеристике сети из области генерирования высокочастотных гармоник ПЧ с АВ. Индуктивность L имеет малую величину (порядка 100 мкГн). Такая величина необходима для ограничения броска тока при включении устройства и сохранении работоспособности конденсаторных батарей. Использование малой индуктивности делает возможным коррекцию частотной характери-

стики и смещение ее из области генерирования высокочастотных гармоник. Собственная частота резонанса СПФ должна быть выше, чем частота резонанса исходной характеристики сети, чтобы сместить частотную характеристику влево и не попасть в область высокочастотных гармоник, генерируемых ПЧ с АВ. После подключения данного СПФ в распределительную сеть 10 кВ возникает смещение резонанса токов в область низкочастотных гармоник. Это, в свою очередь, приводит к значительному улучшению гармонического состава напряжения.

В ходе проведенных исследований была доказана возможность применения специализированных конденсаторных батарей в составе СПФ, способных функционировать при высоких значениях суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_U (вплоть до 45 %) без перегрева и риска выхода из строя. Это делает возможным использование данного устройства в качестве корректора частотной характеристики сети [7, 8, 17].

Определение основных параметров СПФ проводилось экспериментально на основании математической модели металлургического

комплекса ЧерМК ПАО «Северсталь», где реализована распределительная сеть среднего напряжения, и модели приводов [16, 17]. Необходимо выбрать место установки СПФ. Как правило, это общие секции ГПП-10 кВ. Далее необходимо произвести моделирование с подключенным СПФ, где задается различная мощность данного устройства с различной индуктивностью и емкостью. По полученным результатам производится выбор оптимальных параметров СПФ, при которых достигается минимальное значение коэффициента суммарных гармонических искажений напряжений K_U (рис. 5). Для выбранной конфигурации необходимо определить величину тока, протекающего через конденсаторы, и коэффициент искажения по току K_I . Последним этапом проверяется величина броска тока при включении данного фильтра (рис. 6).

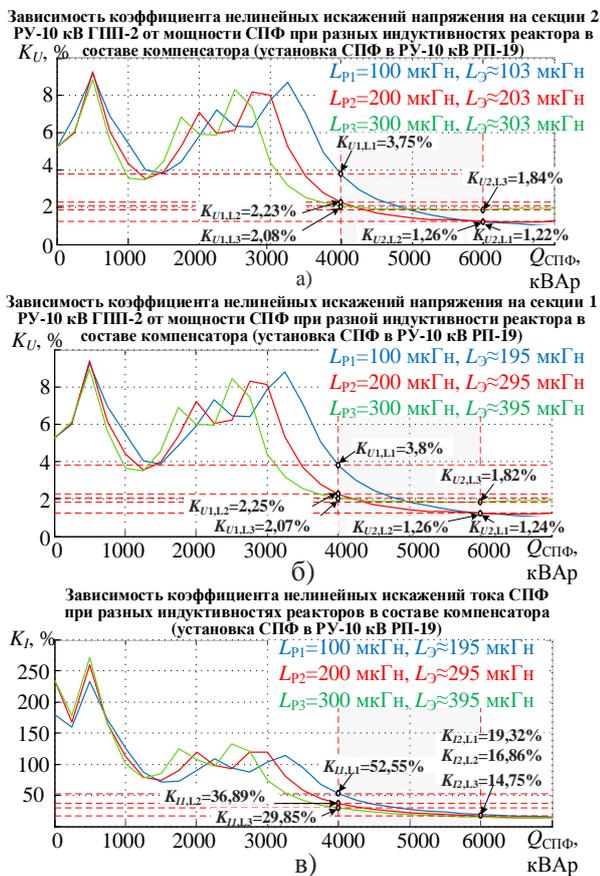


Рис. 5. Сравнение зависимостей коэффициентов нелинейных искажений напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 и токов СПФ, подключенных к секциям РУ-10 кВ ГПП-2 (а) и РП-19 (б, в), от мощности компенсирующего устройства

Результаты математического моделирования, представленные на рис. 5, показали, что для обеспечения нормального функционирования СПФ в сети 10 кВ района ГПП-2 с $K_I \leq 45\%$ (при превышении данного порога конденсаторные батареи будут перегреваться и выйдут из строя) и достижения приемлемого технического эффекта по улучшению гармонического состава

напряжения со снижением исходных значений K_U на секциях 1 и 2 РУ-10 кВ ГПП-2 более чем на 50 % (до $K_U = 1,6-2,99\%$) значение номинальной мощности СПФ должно составлять от 4000 до 6000 кВАр, при этом величина эквивалентной индуктивности между конденсаторами СПФ и секциями РУ-10 кВ ГПП-2 должна составлять не менее $L_3 = 295$ мкГн (рис. 5). В соответствии с этим, величина индуктивности воздушного реактора СПФ может быть определена как разница между граничной индуктивностью L_3 и суммарной индуктивностью КЛ 10 кВ от секций ГПП-2 до точки подключения компенсатора [18–21].

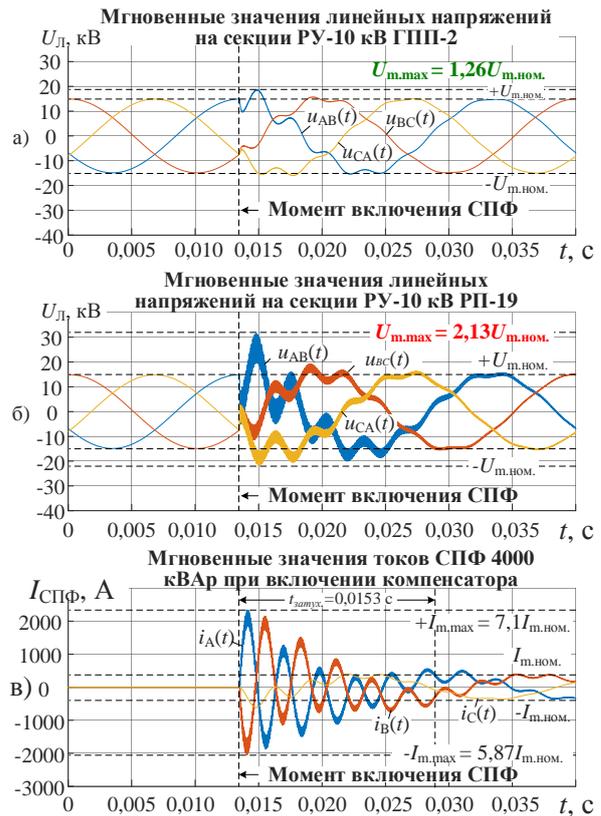


Рис. 6. Переходные процессы при включении одного СПФ 4000 МВАр, установленного в РУ-10 кВ РП-19, при совместной работе секций РУ-10 кВ ГПП-2 и включенных реакторах в ячейках 1 и 21 РУ-10 кВ ГПП-2 (момент включения соответствует максимуму одного из U_n)

Для анализируемой системы электропитания электроприводов прокатного стана была рассмотрена возможность подключения СПФ к секциям РУ-10 кВ РП-19 для коррекции частотных характеристик сети 10 кВ и, соответственно, улучшения качества напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 и РП-19. Согласно результатам исследований, оптимальные значения мощности и индуктивности реактора СПФ при подключении к секциям РУ-10 кВ РП-19 равны соответственно 4000 кВАр и 200 мкГн.

Суммарные коэффициенты искажения тока K_I двух СПФ 4000 кВАр, подключаемых к секциям РУ-10 кВ РП-19, не превышают 36 % для режимов работы ПЧ с АВ ACS6000 на хо-

лостом ходу и под нагрузкой (рис. 5). Технические данные СПФ, рекомендованные для подключения к секциям РУ-10 кВ РП-19, приведены в таблице. Стоит отметить, что для обеспечения надежной работы СПФ в условиях высокого значения K_f (вплоть до 40 %) необходимо применять конденсаторы с пленочным полипропиленовым диэлектриком. На объекте ЧерМК ПАО «Северсталь» рекомендованы к установке батареи конденсаторов фирмы ENERLUX s.r.l. Однако имеются и отечественные производители конденсаторных установок, такие как: ООО «Серпуховский конденсаторный завод «КВАР» (г. Серпухов); Усть-Каменогорский конденсаторный завод (г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан).

Технические данные дополнительных СПФ, рекомендованных к установке для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение, кВ	10,0
Номинальная мощность СПФ, кВАр	4000
Эквивалентная емкость батарей конденсаторов на фазу, мкФ	3 x 127,32
Индуктивность реактора для ограничения броска тока при включении СПФ, мГн	200
Номинальный ток первой гармоники, А	230,9
Максимальный ток при $K_{доп} = 45 \%, А$	254
Номинальная частота, Гц	50,0
Способ включения батарей конденсаторов	Две конденсаторные группы, соединенные в звезду с нейтральным проводом
Степень защиты электрооборудования СПФ	IP00
Уровень изоляции электрооборудования, кВ	38/95 кВ
Тип используемых конденсаторов	Диэлектрик: All polypropylene film, тип изоляторов: фарфор; тип изоляционной жидкости: biod. oil

Благодаря включению СПФ, при всех режимах электроснабжения (раздельная или совместная работа секций РУ-10 кВ ГПП-2) достигается смещение основного резонанса токов с 1300–1750 до 500 Гц, что положительно сказывается на уменьшении значений коэффициентов K_U как на секциях РУ-10 кВ ГПП-2, так и на секциях РУ-10 кВ РП-19.

На завершающем этапе исследований был выполнен анализ переходных процессов напряжений и токов при включении СПФ 4000 кВАр. Вследствие использования воздушных реакторов с малой индуктивностью $L_p = 200$ мкГн, а также высокой эквивалентной емкости батарей конденсаторов, при включении СПФ могут возникать броски емкостного тока большой амплитуды,

вызывающие кратковременные перенапряжения в сети 10 кВ. Для случая использования одного СПФ 4000 кВАр, подключаемого к секциям РУ-10 кВ РП-155, и режима электроснабжения с параллельной работой секций РУ-10 кВ ГПП-2 с питанием от одного из сетевых трансформаторов 110/10 кВ 2Т (1Т) были исследованы амплитуды бросков тока СПФ и уровни перенапряжений на секциях РУ-10 кВ ГПП-2.

Результаты анализа приведены на рис. 6. Математическое моделирование показало, что включение СПФ 4000 кВАр с установленными реакторами в ячейки 1 и 21 РУ-10 кВ ГПП-2 сопровождается повышением уровня перенапряжений на секциях РУ-10 кВ РП-19 в наихудшем варианте (до $2,13U_{m,ном}$), при этом перенапряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 имеют значительно меньший уровень ($1,26U_{m,ном}$). Наибольшая амплитуда броска тока для данного варианта функционирования СПФ составляет $7,1I_{m,ном}$. Время затухания колебаний тока увеличилось по сравнению с другими рассматриваемыми случаями (до 15,5 мс).

Для исключения отключений ПЧ с АВ ACS6000 из-за коммутационных перенапряжений необходимо предусматривать включение СПФ при отключенных силовых преобразователях. Также могут быть использованы другие технические решения по ограничению броска тока, например в виде дополнительных токоограничивающих реакторов в составе СПФ, включаемых перед подачей напряжения и шунтируемых после включения компенсатора [22–24].

Рекомендованный к установке СПФ для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ показан на рис. 7.

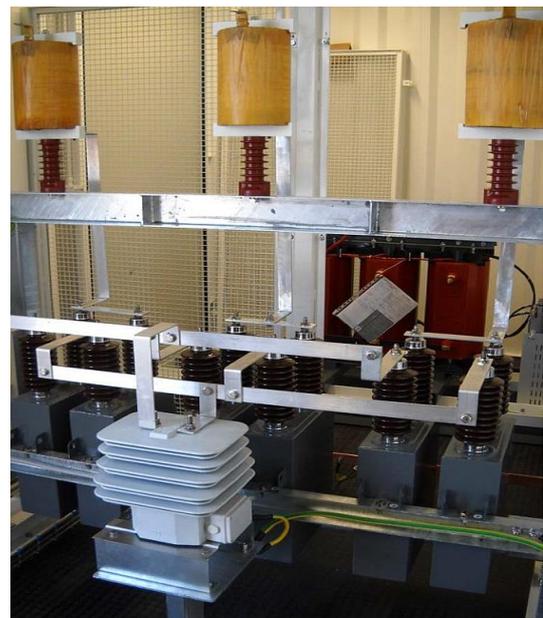


Рис. 7. Специализированный корректирующий фильтр

Анализ изменения гармонического состава напряжений на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 и РП-19

(рис. 8) показывает, что при использовании двух СПФ 4000 кВАр при раздельной работе секций 1 и 2 РУ-10 кВ ГПП-2 достигается уменьшение значения K_U относительно исходных режимов:

- 1) для секций РУ-10 кВ ГПП-2 на 75,2–91,2 % (до значений $K_U = 0,49–1,4$ % без учета искажений напряжения от других электроприемников ГПП-2);
- 2) для секций РУ-10 кВ РП-19 на 81,2–91,8 % (до значений $K_U = 2,20–3,44$ %).

При использовании совместной работы секций РУ-10 кВ ГПП-2 с питанием от одного

трансформатора 1Т (2Т) и двух СПФ на секциях РУ-10 кВ РП-19 технический эффект по снижению K_U в исследуемых точках сети 10 кВ является схожим по уровню. В случае использования одного СПФ 4000 кВАр, устанавливаемого, например, на секцию 1 РУ-10 кВ РП-19, технический эффект по уменьшению K_U на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 снижается в два раза, при этом уменьшение K_U на секциях РУ-10 кВ РП-19 достигается частично (только на той секции, где подключен компенсатор), по сравнению с СЭС без использования СПФ (рис. 2) [25–27].

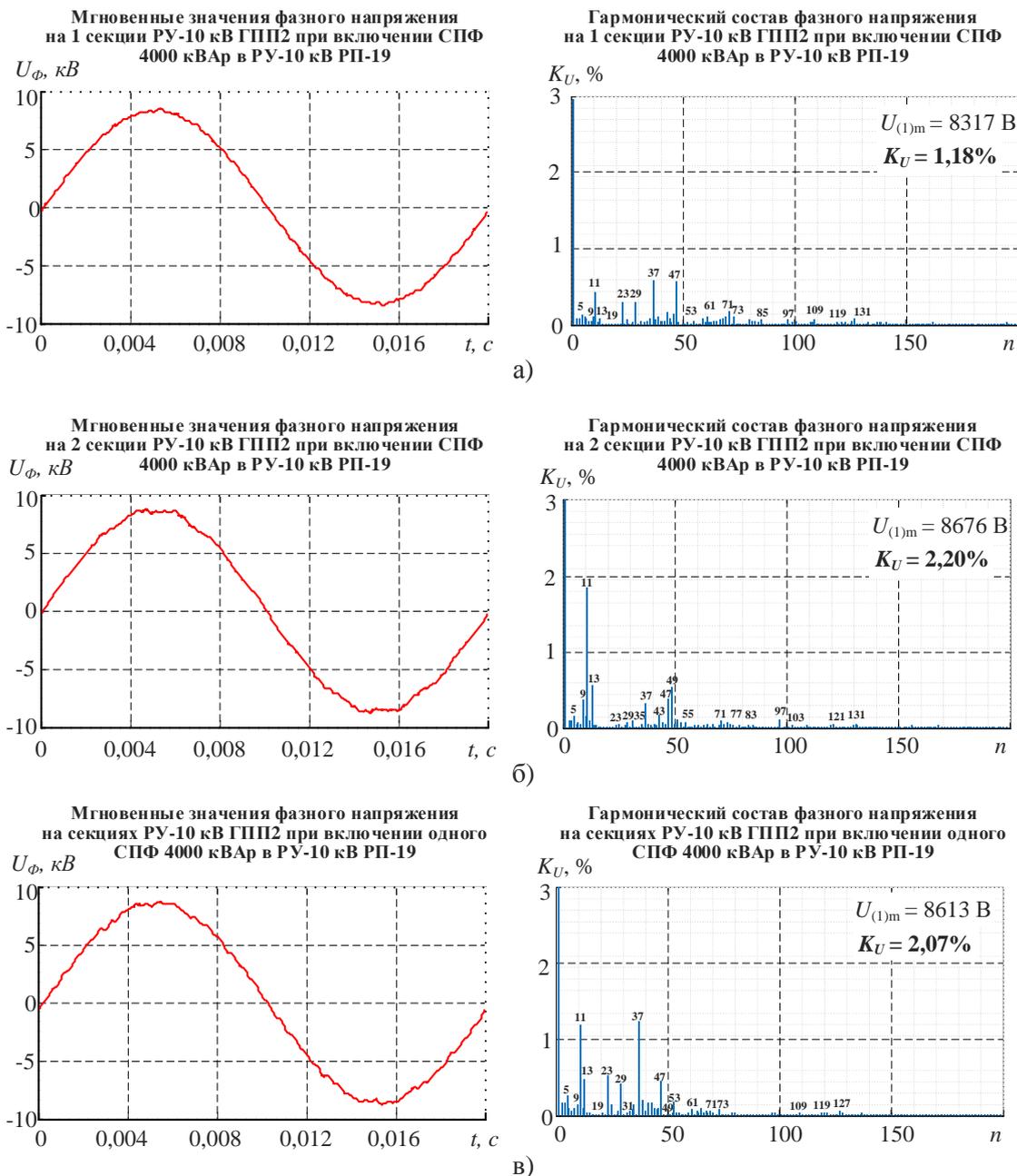


Рис. 8. Гармонический состав фазного напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 при включении СПФ 4000 кВАр в РУ-10 кВ РП-19 без удаления реакторов в ячейках 1 и 21 РУ-10 кВ ГПП-2: а – на секции 1 РУ-10 кВ ГПП-2 при раздельной работе секций на ГПП-2; б – на секции 2 РУ-10 кВ ГПП-2 при раздельной работе секций на ГПП-2; в – на секциях 1 и 2 РУ-10 кВ ГПП-2 при совместной работе секций на ГПП-2

При отключенных токоограничивающих реакторах в ячейках 1 и 21 РУ-10 кВ ГПП-2 эффект от применения СПФ также высокий, однако ниже, чем при подключенных реакторах к ячейкам 1 и 21 для РУ-10 кВ ГПП-2, но при этом для РП-19 выше. При отдельной работе секций РУ-10 кВ ГПП-2 и использовании двух СПФ 4000 кВАр происходит уменьшение коэффициента гармонического искажения напряжения K_U : 1) для секций РУ-10 кВ ГПП-2 уменьшение K_U составляет 61,2–86,5 % (до значений 0,78–2,2 %) без учета искажений напряжения от других электроприемников ГПП-2; 2) для секций РУ-10 кВ РП-19 уменьшение K_U составляет 82,2–97,4 % (до значений 0,78–2,74 %). При совместной работе секций РУ-10 кВ ГПП-2 с питанием от одного трансформатора 1Т (2Т) и двух СПФ на секциях РУ-10 кВ РП-19 технический эффект по снижению K_U в среднем повышается: 1) для секций РУ-10 кВ ГПП-2 до значений 84,0–84,3 % (абсолютные значения $K_U = 0,92–1,22$ %); 2) для секций РУ-10 кВ РП-19 до значений 92,8–97,2 % (абсолютные значения $K_U = 0,92–1,21$ %). Функционирование одного СПФ на секции 1 РУ-10 кВ РП-19 также обеспечивает достижение положительного технического эффекта. В отличие от режима функционирования с реакторами в ячейках 1 и 21, в данном случае достигается больший технический эффект как для секций РУ-10 кВ ГПП-2, так и для секций РУ-10 кВ РП-19, где из-за отсутствия реакторов качество напряжения улучшается на обеих секциях [28–29].

Необходимо отметить, что в обоих случаях значения технических эффектов по снижению K_U на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 и РП-19 выше, чем для рассмотренных вариантов с подключением СПФ соизмеримой мощности (4000 кВАр) к секциям РУ-10 кВ РП-155 или ГПП-2.

Выводы. В результате проведенных исследований были определены причины ухудшения качества напряжения в распределительной сети 10 кВ района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь», приводящие к нарушению режимов работы чувствительных электроприемников, получающих питание от цеховых РП и других подстанций, имеющих связь с секциями РУ-10 кВ ГПП-2: 1) наличие сложных резонансных явлений в распределительной сети 10 кВ района ГПП-2, обусловленных взаимным влиянием индуктивностей сетевых трансформаторов 110/10 кВ, индуктивностей токоограничивающих реакторов в ячейках РУ-10 кВ ГПП-2, а также емкостей кабельных линий 10 кВ; 2) неоптимальные настройки ШИМ активных выпрямителей ПЧ ACS6000 в составе главных электроприводов четырехклетьевого стана, при которых в потребляемых токах ПЧ с АВ содержатся значимые гармонические составляющие, совпадающие с резонансными областями частотных характеристик сети 10 кВ.

На основании комплексной математической модели сети 10 кВ района ГПП-2 и главных электроприводов четырехклетьевого стана был разработан и исследован способ улучшения

гармонического состава напряжения на секциях РУ-10 кВ РП-19 за счет установки специализированных пассивных фильтров для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ. При условии использования технических мер по ограничению броска тока при включении компенсаторов данный вариант обеспечивает достижение максимального технического эффекта по улучшению гармонического состава напряжений на общих секциях РУ-10 кВ ГПП-2, являющихся внутренними точками общего присоединения, а также на секциях РУ-10 кВ РП-19.

Выбор номинальной мощности и индуктивности специализированного пассивного фильтра должен проводиться с учетом двух факторов: 1) требуемого значения K_U на секциях главной понизительной подстанции предприятия, являющихся точками общего присоединения; 2) значения K_f , рассчитанного для тока фильтра, значение которого не должно превышать 45 % согласно требованию обеспечения надежной работы батарей конденсаторов.

Список литературы

1. **Endrejat F., Pillay P.** Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System // IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. – 2007. – P. 736–741.
2. **Николаев А.А., Храмин Т.Р., Афанасьев М.Ю.** Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутривзаводского электроснабжения промышленных предприятий // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – № 4. – С. 51–62.
3. **Resonances** in a High-Power Active-Front-End Rectifier System / J. Pontt, G. Alzamora, R. Huerta, N. Becker // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2005. – Vol. 52, No. 2. – P. 482–488.
4. **Разработка** усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутривзаводской сети / А.А. Николаев, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, А.С. Денисевич // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 47–56.
5. **Alawasa K.M., Moamed R.I., Xu W.** Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – Vol. 29, No. 1. – P. 121–134.
6. **Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В.** Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 59–69.
7. **The Experience** of using Specialised Correction Filters to Improve Power Quality in Electrical Networks with Active Rectifiers / M.Y. Afanasev, A.C. Denisevich, M.V. Bulanov, P.G. Tulupov // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2022. – P. 386–391.
8. **Nikolaev A.A., Afanasev M.Yu., Bulanov M.V.** Application of a Specialized Passive Filter to Correct the Frequency Response of the Supply Network in order to Eliminate the Negative Impact of Resonance Phenomena // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). – 2020. – P. 32–37.

9. **Study** of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier / J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang // IEEE Trans. Power Electron. – 2011. – Vol. 26, No. 12. – P. 3823–3831.

10. **O'Brien K., Teichmann R., Bernet S.** Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conf. and Exposition. – 2001. – P. 557–562.

11. **Celanovic N., Boroyevich D.** A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2001. – Vol. 37, No. 2. – P. 637–641.

12. **Multilevel** multiphase space vector PWM algorithm / O. Lopez, J. Alvarez, J. Doval-Gandoy, F.D. Freijedo // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2008. – Vol. 55, No. 5. – P. 1933–1942.

13. **Blooming T.M., Carnovale D.J.** Application of IEEE STD 5191992 Harmonic Limits // Conf. Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conf. – 2006. – P. 1–9.

14. **Resonance** mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants / J. Pontt, J. Rodriguez, S. Martin, R. Aguilera // Conf. Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conf. Forty-First IAS Annual Meeting. – 2006. – P. 12981302.

15. **Yuquan M., Lihong Z., Shufen H.** Calculation of the Filter Parameters for the Aluminum Electrolysis Rectifier // Intelligent Computation Technology and Automation. – 2010. – P. 906–910.

16. **Development** of a Comprehensive Simulation Model of the Power Supply and Drive System Based on AFE-FC for Power Quality Research / A.A. Nikolaev, M.V. Bulanov, I.G. Gilemov, S.A. Linkov // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2022. – P. 896–901.

17. **Разработка** научно обоснованных технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости мощных промышленных электроприводов с питающей сетью / А.А. Николаев, М.В. Буланов, И.Г. Гилемов и др. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического ун-та им. Г.И. Носова, 2021. – С. 330.

18. **Siebert A., Troederson A., Ebner S.** AC to DC power conversion now and in the future // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2002. – No. 38. – P. 934–940.

19. **Moeini A., Zhao H., Wang S.** A current reference based selective harmonic current mitigation pwm technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers // IEEE Trans. Ind. Electronics. – 2018. – Vol. 65. – P. 727–737.

20. **Research** on hybrid SHEPWM based on different switching patterns / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov, et al. // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2019. – Vol. 10, No. 4. – P. 1875–1884.

21. **Reactive** power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2017. – Vol. 8, No. 4. – P. 1455–1466.

22. **EMC** research of 18-pulse circuit consisting of 3L-NPC converters with SHE / A.S. Maklakov, M.A. Demov, E.A. Maklakova, et al. // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911503.

23. **Research** on hybrid SHEPWM based on different switching patterns / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov,

et al. // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2019. – Vol. 10, No. 4. – P. 1875–1884.

24. **Jing T., Maklakov A.S., Gasiyarova O.A.** Research on Selective Harmonic Elimination Technique based on Particle Swarm Optimization // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – Saint-Petersburg; Moscow, 2019. – P. 694–700. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656834.

25. **Finding** the Best Programmable PWM Pattern for Three-Level Active Front-Ends at 18-Pulse Connection / A.S. Maklakov, T. Jing, A.A. Radionov, et al. // Machines. – 2021. – Vol. 9, No. 7. – P. 127. DOI: 10.3390/machines9070127.

26. **Research** of a flexible space-vector-based hybrid PWM transition algorithm between SHEPWM and SHMPWM for three-level NPC inverters / T. Jing, A.A. Radionov, A.S. Maklakov, V.R. Gasiyarov // Machines. – 2020. – Vol. 8, No. 3. – P. 57. DOI: 10.3390/machines8030057.

27. **Николаев А.А., Гилемов И.Г., Буланов М.В.** Оценка влияния режимов работы электроприводов прокатного стана с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети 10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 5. – С. 41–50.

28. **Николаев А.А., Буланов М.В., Шахбиева К.А.** Разработка адаптивного алгоритма ШИМ активного выпрямителя и способа диагностики резонансных явлений во внутривзаводских сетях // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 4. – С. 44–54.

29. **Обеспечение** электромагнитной совместимости мощных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь» с питающей сетью 10 кВ / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 65–74.

References

1. Endrejat, F., Pillay, P. Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf., 2007, pp. 736–741.

2. Nikolaev, A.A., Khramshin, T.R., Afanas'ev, M.Yu. Issledovanie rezonansnykh yavleniy v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh srednego napryazheniya sistem vnutrizavodskogo elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Study of Resonant Phenomena in Medium Voltage Distribution Networks of Industrial Power Supply Systems]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2017, no. 4, pp. 51–62.

3. Pontt, J., Alzamora, G., Huerta, R., Becker, N. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System. IEEE Trans. Ind. Electron., 2005, vol. 52, no. 2, pp. 482–488.

4. Nikolaev, A.A., Bulanov, M.V., Afanas'ev, M.Yu., Denisevich, A.S. Razrabotka usovershenstvovannogo algoritma SHIM aktivnogo vypryamitelya s adaptatsiyey k rezonansnym yavleniyam vo vnutrizavodskoy seti [Development of an advanced PWM algorithm for active rectifier with adaptation to current resonances in internal power supply system]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 47–56.

5. Alawasa, K.M., Moamed, R.I., Xu, W. Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, vol. 29, no. 1, pp. 121–134.

6. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Bulanov, M.V. Issledovanie parallel'noy raboty avtomatizirovannykh elektroprivodov prokatnogo stana i dugovoy staleplavil'noy pechi [Investigation of parallel work of rolling mill's automated electric drives and an electric arc furnace]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 59–69.
7. Afanasev, M.Y., Denisevich, A.C., Bulanov, M.V., Tulupov, P.G. The Experience of using Specialised Correction Filters to Improve Power Quality in Electrical Networks with Active Rectifiers. 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2022, pp. 386–391.
8. Nikolaev, A.A., Afanasev, M.Yu., Bulanov, M.V. Application of a Specialized Passive Filter to Correct the Frequency Response of the Supply Network in order to Eliminate the Negative Impact of Resonance Phenomena. 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 2020, pp. 32–37.
9. Dong, J., Rixin, L., Fei, W., Fang, L. Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier. *IEEE Trans. Power Electron*, 2011, vol. 26, no. 12, pp. 3823–3831.
10. O'Brien, K., Teichmann, R., Bernet, S. Active rectifier for medium voltage drive systems. *Applied Power Electronics Conf. and Exposition*, 2001, pp. 557–562.
11. Celanovic, N., Boroyevich, D. A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2001, vol. 37, no. 2, pp. 637–641.
12. Lopez, O., Alvarez, J., Doval-Gandoy, J., Freijedo, F.D. Multilevel multiphase space vector PWM algorithm. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2008, vol. 55, no. 5, pp. 1933–1942.
13. Blooming, T.M., Carnovale, D.J. Application of IEEE STD 5191992 Harmonic Limits. *Conf. Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conf.*, 2006, pp. 1–9.
14. Pontt, J., Rodriguez, J., Martin, S., Aguilera, R. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants. *Conf. Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conf. Forty-First IAS Annual Meeting*, 2006, pp. 12981302.
15. Yuquan, M., Lihong, Z., Shufen, H. Calculation of the Filter Parameters for the Aluminum Electrolyzation Rectifier. *Intelligent Computation Technology and Automation*, 2010, pp. 906–910.
16. Nikolaev, A.A., Bulanov, M.V., Gilemov, I.G., Linkov, S.A. Development of a Comprehensive Simulation Model of the Power Supply and Drive System Based on AFE-FC for Power Quality Research. 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022, pp. 896–901.
17. Nikolaev, A.A., Bulanov, M.V., Gilemov, I.G., Afanasev, M.Yu., Shakhbieva, K.A., Laptova, V.A. *Razrabotka nauchno obosnovannykh tekhnicheskikh resheniy po obespecheniyu elektromagnitnoy sovmestimosti moshchnykh promyshlennykh elektroprivodov s pitayushchey set'yu* [Development of scientifically grounded technical solutions to ensure electromagnetic compatibility of powerful industrial electric drives with a mains supply]. Magnitogorsk: Izdatel'stvo Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, 2021, p. 330.
18. Siebert, A., Troederson, A., Ebner, S. AC to DC power conversion now and in the future. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, no. 38, pp. 934–940.
19. Moeini, A., Zhao, H., Wang, S. A current reference based selective harmonic current mitigation pwm technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers. *IEEE Trans. Ind. Electronics*, 2018, vol. 65, pp. 727–737.
20. Jing, T., Maklakov, A., Radionov, A., Baskov, S., Kulmukhametova, A. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1875–1884.
21. Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R., Maklakov, A.S., Maklakova, E.A. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 1455–1466.
22. Maklakov, A.S., Demov, M.A., Maklakova, E.A., Gasiyarov, V.R., Voronin, S.S. EMC research of 18-pulse circuit consisting of 3L-NPC converters with SHE. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911503.
23. Jing, T., Maklakov, A., Radionov, A., Baskov, S., Kulmukhametova, A. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1875–1884.
24. Jing, T., Maklakov, A.S., Gasiyarova, O.A. Research on Selective Harmonic Elimination Technique based on Particle Swarm Optimization. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint-Petersburg; Moscow, 2019, pp. 694–700. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656834.
25. Maklakov, A.S., Jing, T., Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R., Lisovskaya, T.A. Finding the Best Programmable PWM Pattern for Three-Level Active Front-Ends at 18-Pulse Connection. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 7, pp. 127. DOI: 10.3390/machines9070127.
26. Jing, T., Radionov, A.A., Maklakov, A.S., Gasiyarov, V.R. Research of a flexible space-vector-based hybrid PWM transition algorithm between SHEPWM and SHMPWM for three-level NPC inverters. *Machines*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 57. DOI: 10.3390/machines8030057.
27. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V. Otsenka vliyaniya rezhimov raboty elektroprivodov prokatnogo stana s PCh-AV na kachestvo napryazheniya pitayushchey seti 10 kV [Assessment of influence of rolling mill FC-AR electric drive operation mode on 10 kV supply network voltage quality]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 5, pp. 41–50.
28. Nikolaev, A.A., Bulanov, M.V., Shakhbieva, K.A. Razrabotka adaptivnogo algoritma ShIM aktivnogo vypryamitelya i sposoba diagnostiki rezonansnykh yavleniy vo vnutrizavodskikh setyakh [Development of adaptive PWM algorithm for an active rectifier and a method for diagnosing resonant phenomena in in-plant networks]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 4, pp. 44–54.
29. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V., Afanasev, M.Yu., Shakhbieva, K.A., Laptova, V.A. Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti moshchnykh elektroprivodov chetyrekhklet'evogo stana PPP KhP CherMK PAO «Severstal'» s pitayushchey set'yu 10 K [Protection of the electromagnetic coating of electric drives of the four-stand mill PPP KHP CherMK PJSC “Severstal” with a 10 kV supply network]. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 65–74.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333

Александр Николаевич Голубев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий, Россия, Иваново, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Синхронный многофазный электропривод с управлением по основному энергетическому каналу

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из вариантов улучшения технико-экономических характеристик синхронного электропривода является его построение на базе исполнительного двигателя с увеличенным числом фаз. Однако специфика m -фазного ($m > 3$) синхронного двигателя, связанная с переносом электромагнитной энергии целым спектром пространственных гармонических поля, ставит задачу разработки построения системы автоматического управления, учитывающей эти особенности.

Материалы и методы. Использован метод расчета характеристик m -фазного синхронного двигателя в квазистационарных режимах на основе использования спектральных векторов электромагнитных параметров для его отдельных подструктур как объекта управления.

Результаты. Предложен подход к исследованию и расчету энергетических характеристик m -фазного синхронного двигателя для различных законов управления, реализуемый на базе уравнений его эквивалентной расчетной схемы замещения. Приведены результаты исследования основных энергетических характеристик двигателя для различных законов управления по основному энергетическому каналу.

Выводы. Для реализации преимуществ многофазного синхронного двигателя необходима принудительная ориентация требуемого взаимного расположения векторов потокоцепления и тока статора для высших пространственных гармоник, что может быть реализовано на базе многоканального принципа построения системы управления.

Ключевые слова: синхронный электропривод, многофазный синхронный двигатель, энергетические характеристики, временные и пространственные гармоники

Aleksandr Nikolaevich Golubev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Theoretical Foundations of Electrotechnics and Electrotechnology Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Synchronous multiphase electric drive with main control power channel

Abstract

Background. One of the options to improve the technical and economic characteristics of a synchronous electric drive is to design it based on an actuating motor with an increased number of phases. However, the characteristics of m -phase ($m > 3$) synchronous motor associated with the transfer of electromagnetic energy by a whole spectrum of spatial harmonic fields sets the task to develop an automatic control system that considers these features.

Materials and methods. The method to calculate the characteristics of an m -phase synchronous motor in quasi-stationary modes based on the use of spectral vectors of electromagnetic parameters for its individual substructures as a control object is used.

Results. The authors have proposed an approach to study and calculate energy characteristics of m -phase synchronous motor for different control laws implemented on the basis of equations of its design equivalent circuit. The results of the study of the main energy characteristics of the engine for various control laws along the main energy channel are presented. **Conclusions.** To implement the advantages of a multiphase synchronous motor, it is necessary to force the required mutual arrangement of the flux linkage vectors and stator current for higher spatial harmonics. It can be implemented based on the multi-channel principle of control system design.

Key words: synchronous electric drive, multiphase synchronous motor, energy characteristics, temporal and spatial harmonics

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.053-059

Введение. Построение синхронного регулируемого электропривода (ЭП) при высоких требованиях к его статическим и динамическим характеристикам, диапазону регулирования скорости и повышенным энергетическим показателям сталкивается со сложностью исполнительного двигателя как объекта управления (ОУ), что приводит к конструктивно-технической сложности как преобразователя частоты (ПЧ), так и всей электромеханической системы (ЭМС). При использовании в ЭП низковольтных источников энергии, имеющих широкое применение в специальных автономных установках, значимость данной проблемы возрастает.

При разработке ЭП традиционно используется концепция конструктивной неизменности исполнительного двигателя и функциональной зависимости конструкции ПЧ и системы управления ЭП от требований к характеристикам ЭМС. Очевидно, что ужесточение требований к качеству регулировочных характеристик ЭМС обуславливает усложнение как силового преобразователя, так и системы управления. В этой связи при рассмотрении ЭП как единого функционального элемента целесообразно использовать концепцию конструктивной вариативности всех его основных составных компонентов, в том числе и исполнительного двигателя. Такая стратегия позволяет принимать более простые технические решения благодаря рациональному перераспределению ряда функциональных свойств ЭМС между ее основными элементами, что обуславливает снижение трудности при их практической реализации. Важнейшим параметром, который оказывает самое существенное влияние на характеристики ЭП и обеспечивает оптимизацию целого спектра его технико-экономических показателей [1–6], является число фаз m статорной обмотки исполнительного двигателя.

Особенности m -фазного ($m > 3$) синхронного двигателя (СД) как ОУ, связанные в первую очередь с увеличением числа фазных электромагнитных переменных и специфическим по сравнению с традиционными 3-фазными двигателями переносом электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим [5, 6], обуславливают необходимость особого подхода к построению системы автоматического управления (САУ), т. е. использованию специальных принципов управления и структурного построения САУ,

обеспечивающих наиболее полное использование преимуществ m -фазной машины в плане общего улучшения технико-экономических характеристик синхронного ЭП [6].

Обеспечение повышенного быстродействия, высокой перегрузочной способности и высокого качества регулирования частоты вращения, требуемой степени электромагнитного использования исполнительного двигателя, что является определяющим фактором при построении ЭП, требует выполнения условий оптимального использования габаритной мощности СД, а именно [7]:

1) работы СД в заданном диапазоне изменения скорости и нагрузки с номинальным потокосцеплением статора ($\Psi_{зад} = \Psi_{сном}$);

2) работы СД с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 1$ или близким к нему.

Выполнение этих требований приводит к приемлемым результатам не только для 3-фазных ЭП. Они могут быть успешно использованы и при синтезе m -фазных ($m > 3$) ЭП. Однако при этом необходимо учесть следующие факторы:

1) в случае построения ЭП с увеличенным числом фаз отпадает необходимость формирования фазных токов по синусоидальному закону, что не приводит к ухудшению качества энергетических и регулировочных характеристик ЭМС [6], но обуславливает отказ от использования в САУ контуров регулирования фазных токов в неподвижной системе координат, характерных для 3-фазных синхронных ЭП с частотно-токовым управлением [7];

2) САУ m -фазным СД должна быть инвариантна к числу его фаз, что определяет целесообразность реализации ЭП на основе модульно-фазового принципа управления (система управления формирует модуль и фазу вектора напряжения статора $\bar{U}_{s(1)}$, приведенного к первой пространственной гармонической $v = 1$) [5].

Такой подход к построению САУ хорошо зарекомендовал себя при реализации m -фазных ($m > 3$) асинхронных ЭП [8]. Его особенность связана с отсутствием прямого контроля за приведенными векторами электромагнитных переменных $\bar{Y}_{(v)}$ для $v > 1$ [8]. При этом косвенное воздействие на них в асинхронном ЭП осуществляется за счет выбора необходимого соче-

тания непосредственно регулируемых переменных. В m -фазном синхронном ЭП при заданном возбуждении при реализации модульно-фазового принципа в качестве непосредственно регулируемого параметра следует принять спектральный вектор тока статора $\bar{I}_{s(1)}$, приведенный к первой пространственной гармонической ($\nu = 1$) [5]. Обоснованием этого является тот факт, что именно энергетический канал для $\nu = 1$ определяет основной поток электромагнитной энергии и, следовательно, основную долю электромагнитного момента m -фазного СД. Энергия остальных каналов управления ($1 < \nu < m$) определяется спектральным составом фазных напряжений; при этом при заданном законе управления векторы $\bar{U}_{s(\nu)}$ однозначно связаны с вектором $\bar{U}_{s(1)}$.

Методы исследования. С учетом принятой концепции на реализацию модульно-фазового принципа следует выделить три закона управления m -фазным СД [7]:

а) $\text{Re} \left[\hat{\Psi}_{s(1)} \bar{I}_{s(1)} \right] = 0$, т. е. обеспечение ортогональности векторов потокосцепления статора $\bar{\Psi}_{s(1)}$ и тока статора $\bar{I}_{s(1)}$ при $\Psi_{s(1)} = \text{const}$;

б) $\text{Re} \left[\hat{\Psi}_{\delta(1)} \bar{I}_{s(1)} \right] = 0$, т. е. обеспечение ортогональности векторов главного потокосцепления $\bar{\Psi}_{\delta(1)}$ (потокосцепления в воздушном зазоре) и тока статора $\bar{I}_{s(1)}$ при $\Psi_{\delta(1)} = \text{const}$;

в) $\text{Re} \left[\hat{\Psi}_{f(1)} \bar{I}_{s(1)} \right] = 0$, т. е. обеспечение ортогональности вектора тока статора $\bar{I}_{s(1)}$ к про-

дольной оси ротора d при потокосцеплении обмотки возбуждения

дольной оси ротора d при потокосцеплении обмотки возбуждения

$$\Psi_{f(1)} = M_{f(1)} I_f = \text{const}.$$

Анализ векторных диаграмм, соответствующих m -фазному СД для основного (первого $\nu = 1$) энергетического канала [5], позволяет получить выражения составляющих вектора тока статора $\bar{I}_{sd(q)(1)}$ по ортогональным осям d и q

$$I_{sd(q)(1)} = f(\Psi_{s(\delta)\text{НОМ}}, M_{\text{ЭМ}(1)}, L_{q(1)}, m) \quad (1)$$

и тока возбуждения

$$I_{f(1)} = f(\Psi_{s(\delta)\text{НОМ}}, M_{\text{ЭМ}(1)}, I_{sd(1)}, I_{sq(1)} L_{d(1)}, L_{q(1)}) \quad (2)$$

в функции требуемого значения электромагнитного момента $M_{\text{ЭМ}(1)}$, реализуемые в блоках нелинейностей (БН) в САУ ЭП (рис. 1). Здесь $L_{d(1)}, L_{q(1)}, M_{f(1)}$ – параметры схемы замещения m -фазного СД как ОУ для основного энергетического канала ($\nu = 1$) [5].

Для случая в) справедливы соотношения:

$$I_{sd(1)}(M_{\text{ЭМ}(1)}) = 0; \quad (3)$$

$$I_{sq(1)}(M_{\text{ЭМ}(1)}) = \frac{M_{\text{ЭМ}(1)}}{\frac{m}{2} Z_p M_{f(1)} I_f}; \quad (4)$$

$$I_f(M_{\text{ЭМ}(1)}) = \text{const}. \quad (5)$$

Функциональная схема m -фазного синхронного ЭП, построенного по модульно-фазовому принципу управления, реализуемого по первому энергетическому каналу, приведена на рис. 1.

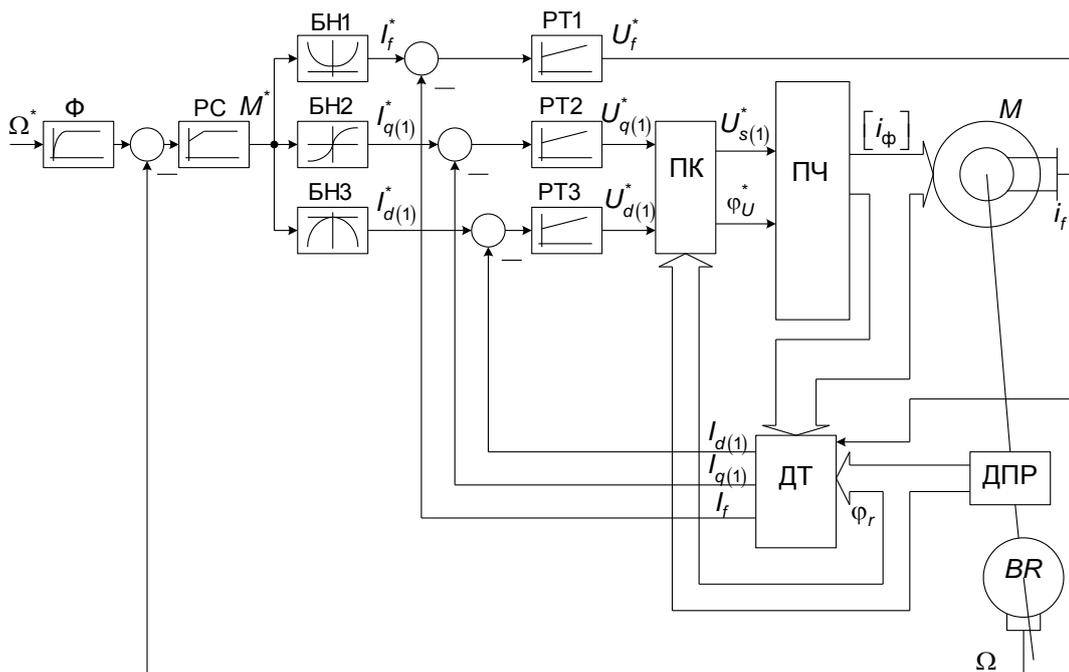


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема САУ m -фазным СД по первому энергетическому каналу

Исследование m -фазного синхронного ЭП с реализацией модульно-фазового принципа управления позволяет выявить особенности влияния канала возбуждения на электромагнитные процессы в исполнительном двигателе, которое является в общем случае неоднозначным. Причина в том, что наличие этого канала неконтролируемо изменяет взаимное расположение векторов тока статора и потокоцеплений, приведенных к высшим ($\nu > 1$) пространственным гармоникам [5]. В итоге для $\nu > 1$ составляющие электромагнитного момента могут оказаться отрицательными, что указывает на то, что поток энергии по ν -му энергетическому каналу меняет свое направление: от СД к источнику.

Взаимное расположение приведенных спектральных векторов напряжений, токов и потокоцеплений для различных ν -х пространственных гармонических ($\nu < m$) наглядно иллюстрируют векторные диаграммы, соответствующие закону управления с ориентацией на вектор потокоцепления статора $\bar{\Psi}_s$ (рис. 2–5). Они построены на основании баланса напряжений, уравнения которого при разложении на оси d, q вращающейся системы координат имеют вид:

$$\bar{U}_{sd(\nu)} = j\nu\omega L_{sq(\nu)} \bar{I}_{sq(\nu)} + R_s \bar{I}_{sd(\nu)};$$

$$\bar{U}_{sq(\nu)} = j\nu\omega M_{f(\nu)} \bar{I}_f + j\nu\omega L_{sd(\nu)} \bar{I}_{sd(\nu)} + R_s \bar{I}_{sq(\nu)};$$

Диаграммы соответствуют 12-фазному СД при номинальном значении тока возбуждения. Обеспечение дополнительных положительных постоянных составляющих электромагнитного момента $M_{(\nu)} > 0$, т. е. $P_{M(\nu)} > 0$, реализуется при расположении векторов $\bar{\Psi}_{(\nu)}$ и $\bar{I}_{s(\nu)}$ в первом и втором квадрантах систем координат, вращающихся со скоростями $\nu\omega$. При противоположном направлении вращения координатной системы эти векторы должны находиться соответственно в четвертом и третьем квадрантах.

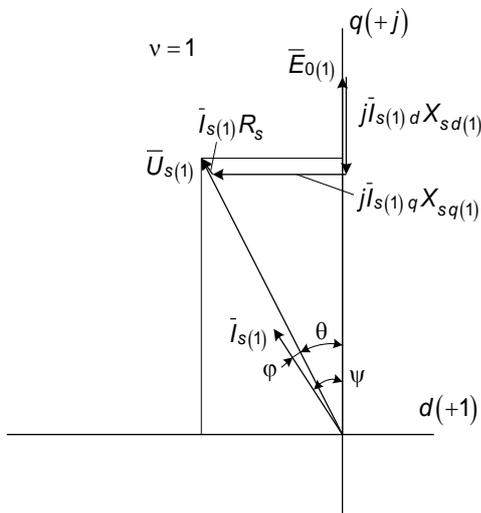


Рис. 2. Векторная диаграмма 12-фазного СД для $\nu = 1$

Это расположение векторов соответствует положительным составляющим электромагнитного момента для ν -х гармонических тока, т. е. направлению потока энергии по ν -му энергетическому каналу от источника энергии к СД. Анализ приведенных векторных диаграмм достаточно наглядно иллюстрирует причину возникновения отрицательных по знаку (тормозных) моментов от ν -х высших гармонических тока. Это обусловлено невыполнением указанного условия взаимного расположения векторов $\bar{I}_{s(\nu)}$ и $\bar{\Psi}_{(\nu)}$ соответственно во втором и первом или в третьем и четвертом квадрантах.

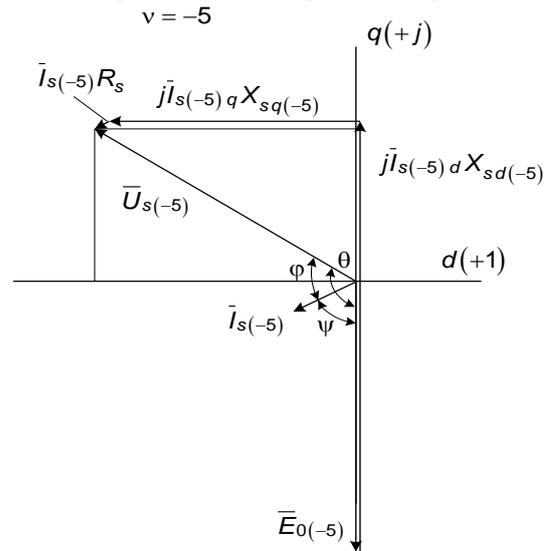


Рис. 3. Векторная диаграмма 12-фазного СД для $\nu = -5$

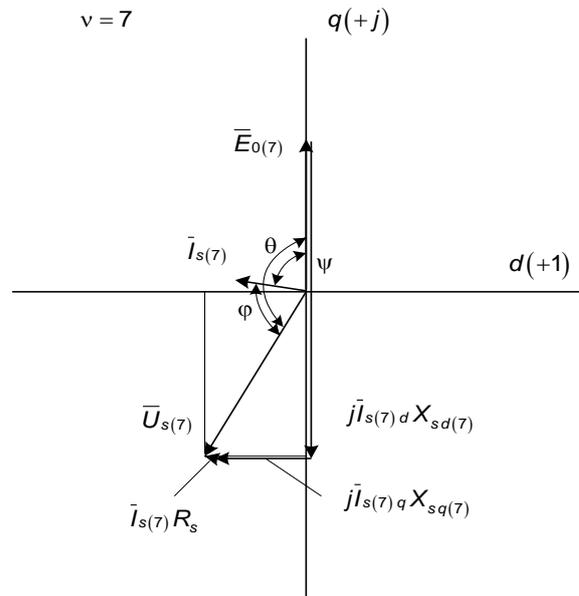


Рис. 4. Векторная диаграмма 12-фазного СД для $\nu = 7$

Представленные диаграммы (рис. 2, 3) справедливы при ограничении рассматриваемых спектров векторов $\bar{Y}_{(\nu)}$ соотношением

$\mu = \nu$, что справедливо при $m \geq 7 \dots 9$. При рассмотрении полного спектра μ временных гармоник запись уравнений баланса напряжений следует осуществлять с учетом производной по времени от потокосцепления $\frac{d\bar{\Psi}_{s(\nu)}}{dt}$. Однако при этом векторные диаграммы (при их качественном подобии рассмотренным) для различных моментов времени в количественном отношении будут различны.

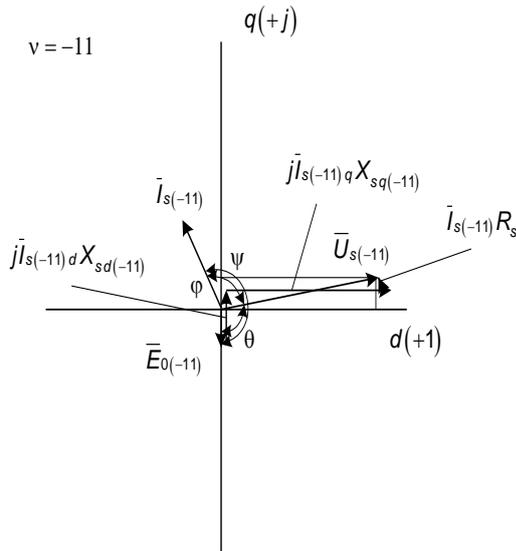


Рис. 5. Векторная диаграмма 12-фазного СД для $\nu = -11$

В отличие от m -фазного асинхронного двигателя, исследование квазистационарных режимов работы m -фазного СД возможно только во вращающейся системе координат d - q . Это усложняет решение задачи имитационного моделирования САУ, реализующей выбранный закон управления. В этой связи интерес представляет подход к исследованию энергетических характеристик в статике для различных законов управления, реализуемый на базе уравнений эквивалентной расчетной схемы замещения m -фазного СД. На его основе могут быть построены векторные диаграммы. Это позволяет отказаться от проведения численного эксперимента путем моделирования всего ЭП. При этом используются спектральные векторы, приведенные к ν -м пространственным гармоническим, при ограничении $\mu = \nu$. Суть подхода заключается в расчете электромагнитных процессов в квазистационарном режиме в общем случае для всех ν -х подструктур ($\nu < m$) m -фазного СД [4]. Выполнение расчета может быть разбито на следующие этапы:

1) для известных значений составляющих вектора тока статора по первой гармонике $I_{s(1)d}$, и тока возбуждения I_f , полученных по

формулам (1), (2) или (3)–(5), определяется вектор напряжения статора $\bar{U}_{s(1)} = U_{m(1)} e^{j\varphi}$:

$$U_{s(1)d} = I_{s(1)d} R_s - \omega L_{q(1)} I_{s(1)q};$$

$$U_{s(1)q} = I_{s(1)q} R_s + \omega (L_{d(1)} I_{s(1)d} + M_{f(1)} I_f');$$

$$U_{s(1)} = \sqrt{U_{s(1)d}^2 + U_{s(1)q}^2};$$

$$\varphi = f(U_{s(1)d}, U_{s(1)q}),$$

где ω – угловая частота вращения;

2) рассчитываются векторы напряжения статора $\bar{U}_{s(\nu)}$ для ν -х гармоник через составляющие вектора $\bar{U}_{s(1)}$:

$$\bar{U}_{s(\nu)}^p = \frac{U_{s(1)}}{\mu} \cos \nu \varphi + j \frac{U_{s(1)}}{\mu} \sin \nu \varphi; \quad (6)$$

3) по полученным значениям $U_{s(\nu)d}$, $U_{s(\nu)q}$ и тока возбуждения I_f' определяются составляющие векторов тока статора $\bar{I}_{s(\nu)}$ для ν -х гармоник:

$$I_{s(\nu)d} = \frac{U_{s(\nu)d} + \frac{\nu \omega L_{q(\nu)}}{R_s} [U_{s(\nu)q} - \nu \omega M_{f(\nu)} I_f']}{R_s + \frac{\nu^2 \omega^2 L_{d(\nu)} L_{q(\nu)}}{R_s}};$$

$$I_{s(\nu)q} = \frac{U_{s(\nu)q} - \frac{\nu \omega L_{d(\nu)}}{R_s} U_{s(\nu)d} - \nu \omega M_{f(\nu)} I_f'}{R_s + \frac{\nu^2 \omega^2 L_{d(\nu)} L_{q(\nu)}}{R_s}};$$

4) по составляющим вектора тока статора $I_{s(\nu)d}$, и току возбуждения I_f' рассчитываются составляющие электромагнитного момента $M_{эм(\nu)}$:

$$M_{эм(\nu)} = \frac{m}{2} \nu z_p [2 M_{(2\nu)} I_{s(\nu)d} I_{s(\nu)q} + M_{f(\nu)} I_f' I_{s(\nu)q}];$$

5) в случае необходимости определяются составляющие вектора потокосцепления $\bar{\Psi}_{s(\nu)}$.

Физический смысл параметров, входящих в эти формулы, приведен в [5].

Следует отметить, что в формуле (6) уменьшение амплитуды напряжения μ -й гармоники в μ раз по отношению к первой соответствует простейшей прямоугольно-ступенчатой форме питающего напряжения, целесообразной для m -фазных ($m > 3$) двигателей. В общем случае амплитуда μ -й гармоники должна определяться на основе разложения конкретной используемой кривой фазного напряжения в ряд Фурье.

Результаты исследования. В качестве примера для СД с числом фаз $m = 12$ мощностью $P_{ном} = 5$ кВт приведены расчетные значения механической $P_{м(\nu)}$ и электрической $P_{эл(\nu)}$ мощностей, общего КПД η , а также модулей

общего I_s и приведенной к первой пространственной гармонической $I_{s(1)}$ векторов тока статора в статическом режиме для номинальных скорости и нагрузки на валу (см. таблицу, где представлены три варианта управления СД: с ориентацией на вектор $\bar{\Psi}_{s(1)}$; с ориентацией на вектор $\bar{\Psi}_{\delta(1)}$ и обеспечением ортогональности векторов $\bar{I}_{s(1)}$ и $\bar{\Psi}_{f(1)}$).

Качественно аналогичные результаты имеют место и при других скоростях и нагрузках.

Представленные в таблице значения мощностей $P_{эл(v)}$ и $P_{м(v)}$ показывают, что построение САУ по одноканальному принципу (для $v = 1$) не обеспечивает в общем случае создание положительных постоянных составляющих момента по высшим ($v > 1$) гармоническим поля во всем диапазоне изменения нагрузки и скорости вращения исполнительного m -фазного СД (на изменение направления потока энергии указывает знак «минус»).

Для решения этой задачи теоретически можно либо увеличить задание на возбуждение, либо эксплуатировать двигатель на пониженных скоростях, причем при малых нагрузках на валу. Увеличение потокосцепления на 15–30 % для «положительного» использования высших гармоник (создание дополнительных постоянных составляющих электромагнитного момента) в принципе допустимо, однако обуславливает увеличение потерь в стали и на возбуждение, при этом возрастает вероятность попадания в зону насыщения. Исследования показывают, что увеличе-

ние задания на ток возбуждения I_f^* при сохранении установленной номинальной мощности СД снижает модуль тока статора $|\bar{I}_s|$. Например, при увеличении I_f^* на 20–30 % обратно пропорционально снижается величина тока статора.

Кроме того, увеличение возбуждения обуславливает как уменьшение потерь в меди обмотки статора $P_{м(1)} = I_{s(1)}^2 R_s$, так и снижение электрической $P_{эл(1)}$ и механической $P_{м(1)}$ мощностей по основной гармонике тока $I_{s(1)}$. Помимо уменьшения модуля тока статора, это связано с возникновением дополнительных постоянных составляющих момента для высших $v > 1$ пространственных гармоник.

Однако следствием усиления сигнала задания по каналу возбуждения САУ является насыщение магнитопровода СД, что приводит к снижению эффективности управления ЭП. Снижение нагрузочного момента, приложенного к валу СД, и задания на скорость вращения является само по себе достаточным условием получения дополнительных постоянных составляющих электромагнитного момента по высшим гармоникам. Однако это не является решением проблемы, поскольку СД в этом случае может работать примерно лишь на половине от своей номинальной мощности. Итогом являются недостаточное использование габаритной мощности СД, низкий КПД ЭП и, как следствие, его повышенная себестоимость.

Энергетические показатели 12-фазного СД ($P_{ном} = 5$ кВт, $\Omega_{ном} = 314$ рад/с)

Закон управления	I_f^*	$\frac{P_{м(1)}}{P_{э(1)}}$, Вт	$\frac{P_{м(-5)}}{P_{э(-5)}}$, Вт	$\frac{P_{м(7)}}{P_{э(7)}}$, Вт	$\frac{P_{м(-11)}}{P_{э(-11)}}$, Вт	η , %	I_s , А	$\frac{I_{s(1)}}{I_s}$, %	$\frac{M_{\Sigma}}{M_{эм(1)}}$, %
$\bar{\Psi}_{s(1)} \perp \bar{I}_{s(1)}$	$0,7 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5436}$	$\frac{-12,21}{-7,781}$	$\frac{-39,513}{-36,857}$	$\frac{3,377}{3,866}$	91,761	2,705	99,093	99,033
	$1,1 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5176}$	$\frac{-6,661}{9,531}$	$\frac{42,795}{45,926}$	$\frac{-4,89}{-4,104}$	96,23	1,799	94,822	100,625
	$1,3 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5126}$	$\frac{31,357}{51,494}$	$\frac{13,974}{15,57}$	$\frac{5,571}{6,622}$	97,125	1,569	91,993	101,018
$\bar{\Psi}_{\delta(1)} \perp \bar{I}_{s(1)}$	$0,7 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5436}$	$\frac{2,937}{7,863}$	$\frac{-8,869}{-8,623}$	$\frac{-4,731}{-4,453}$	91,854	2,697	99,386	99,787
	$1,1 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5176}$	$\frac{0,924}{-15,099}$	$\frac{42,623}{46,764}$	$\frac{-5,682}{-5,003}$	96,21	1,801	94,701	100,437
	$1,3 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5126}$	$\frac{27,497}{48,049}$	$\frac{17,626}{19,373}$	$\frac{4,322}{5,41}$	97,113	1,572	91,788	100,989
$\bar{\Psi}_{f(1)} \perp \bar{I}_{s(1)}$	$0,7 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5436}$	$\frac{3,739}{24,473}$	$\frac{-29,603}{-24,407}$	$\frac{3,399}{4,498}$	91,472	2,765	96,948	99,551
	$1,1 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5176}$	$\frac{-3,041}{19,918}$	$\frac{32,149}{35,921}$	$\frac{-3,507}{-2,43}$	96,085	1,835	92,95	100,512
	$1,3 I_{fном}^*$	$\frac{4999}{5126}$	$\frac{34,833}{59,32}$	$\frac{8,606}{11,488}$	$\frac{5,532}{6,741}$	97,016	1,599	90,244	100,98

Стремление достичь эффекта положительного направления потока энергии по высшим гармоникам напряжений и токов от источника питания к исполнительному двигателю путем изменения кратности пускового момента и интенсивности задания скорости СД также не приводит к желаемым результатам. Это свидетельствует о том, что формирование динамики переходного процесса только по основному энергетическому каналу САУ не оказывает необходимого влияния на направление перетока энергии между СД и источником по высшим ($\nu > 1$) гармоникам в квазиустановившемся режиме работы ЭП.

Выводы. Реализация САУ m -фазным СД по одноканальному принципу (для $\nu = 1$), эффективно действующему в многофазном асинхронном ЭП, и исследование энергетических характеристик m -фазного синхронного ЭП, реализуемого в рамках этого принципа управления, показали, что наличие общего канала возбуждения обуславливает неконтролируемое взаимное расположение векторов тока статора и потокосцеплений, приведенных к высшим пространственным гармоническим. Это в общем случае приводит к созданию отрицательных постоянных составляющих электромагнитного момента для высших гармонических с порядковыми номерами, меньшими m . Указанное позволяет сделать вывод о необходимости принятия специальных мер при построении ЭП для реализации преимуществ многофазного СД. Такой подход может быть реализован на основе целенаправленного формирования электромагнитных переменных m -фазного СД по всем энергетическим каналам (для $\nu < m$) путем принудительного обеспечения необходимого взаимного расположения векторов потокосцепления и тока статора для высших пространственных гармоник, т. е. на базе многоканального принципа построения САУ.

Список литературы

1. McLean G.W., Nix G.F., Alwash S.R. Performance and design of induction motors with square-wave excitation // Proc. IEE. – 1969. – Vol. 116, No. 8. – P. 1405–1411.
2. Кац Ю.Г. Взаимодействие временных и пространственных гармоник в многофазной электрической машине // Вопросы теории и расчета мощных электромашинно-тиристорных комплексов. – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1979. – С. 90–99.
3. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Перспективы применения многофазных машин переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 1. – С. 19–26.
4. Бражников В.Ф., Соустин Б.П. Теория установившихся электромагнитных процессов в многофазном асинхронном инверторном электроприводе: в 2 ч. / Краснояр. ун-т. – Красноярск, 1985. – 330 с.

5. Голубев А.Н., Лапин А.А. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 8–13.

6. Голубев А.Н., Лапин А.А. Многофазный синхронный электропривод // Электричество. – 2005. – № 2. – С. 43–47.

7. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

8. Голубев А.Н. Многофазный асинхронный регулируемый электропривод для высокодинамичных систем подвижных установок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03; Санкт-Петерб. гос. электротехн. ун-т. – СПб., 1994. – 430 с.

References

1. McLean, G.W., Nix, G.F., Alwash, S.R. Performance and design of induction motors with square-wave excitation. Proc. IEE., 1969, vol. 116, no. 8, pp. 1405–1411.
2. Kats, Yu.G. Vzaimodeystvie vremennykh i prostanstvennykh garmonik v mnogofaznoy elektricheskoy mashine [Interaction of temporal and spatial harmonics in multiphase electric machine]. *Voprosy teorii i rascheta moshchnykh elektromashinno-tiristornykh kompleksov* [Issues on the theory and calculation of powerful electrical machine-thyristor complexes]. Leningrad: VNIIElektromash, 1979, pp. 90–99.
3. Tereshkin, V.M., Grishin, D.A., Makulov, I.A. Perspektivy primeneniya mnogofaznykh mashin peremennogo toka [Prospects of application of multiphase AC machines]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2017, no. 1, pp. 19–26.
4. Brazhnikov, V.F., Soustin, B.P. *Teoriya ustanovivshikhsya elektromagnitnykh protsessov v mnogofaznom asinkhronnom invertornom elektroprivoде: v 2 ch.* [Theory of steady-state electromagnetic processes in multi-phase asynchronous inverter drive: in 2 parts]. Krasnoyarsk, 1985. 330 p.
5. Golubev, A.N., Lapin, A.A. Matematicheskaya model' sinkhronnogo dvigatelya s mnogofaznoy statornoy obmotkoy [Mathematical model of synchronous motor with polyphase stator winding]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 8–13.
6. Golubev, A.N., Lapin, A.A. Mnogofaznyy sinkhronnyy elektroprivod [Multi-phase synchronous electric drive]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 2, pp. 43–47.
7. Slezhanovskiy, O.V., Datskovskiy, L.X., Kuznetsov, I.S., Lebedev, E.D., Tarasenko, L.M. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov peremennogo toka s ventil'nymi preobrazovatelyami* [Systems of secondary control of AC electric drives with valve converters]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 256 p.
8. Golubev, A.N. *Mnogofaznyy asinkhronnyy reguliruemyy elektroprivod dlya vysokodinamichnykh sistem podvizhnykh ustanovok.* Diss. ... d-ra tekhn. nauk [Multi-phase asynchronous adjustable electric drive for highly dynamic systems of mobile installations. Dr. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 1994. 430 p.

УДК 621.3+62-5+004.413.2

Игорь Сергеевич Полющенко

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

Модельно-ориентированное программирование как инструмент инженера-электромеханика

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современные электроприводы с микропроцессорным управлением являются сложными техническими системами, в которых программное обеспечение осуществляет согласование различных физических процессов в целях автоматического управления движением. При этом для инженеров-электромехаников характерен недостаток, связанный с незнанием современной микропроцессорной техники, выразительных и удобных языков программирования, а также современных средств разработки и отладки программного обеспечения, что серьезно затрудняет для них самостоятельную разработку электроприводов. Кроме того, имеется профессиональный барьер между электромеханиками и программистами, который в значительной мере препятствует их совместной работе над программным обеспечением электроприводов. В то же время существуют средства модельно-ориентированного программирования, предназначенные для разработки программного обеспечения в графической форме с описанием встроенных модулей микроконтроллера в виде конфигурируемых модельных блоков. Однако теория и практика применения этой технологии все еще ограничены и требуют развития. В связи с этим задача раскрытия и развития потенциала модельно-ориентированного программирования как полноценного средства разработки систем управления является актуальной.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования с применением метода системного анализа профессиональных компетенций выбраны инженеры-электромеханики, с одной стороны, и специалисты-разработчики программного обеспечения, с другой стороны.

Результаты. Рассмотрено значение программного обеспечения микропроцессорных систем управления электроприводов. Дана оценка возможностей инженера-электромеханика, имеющего подготовку по электромеханическим профилям бакалавриата и магистратуры направления «Электроэнергетика и электротехника», как разработчика электроприводов с микропроцессорным управлением. Определен потенциал модельно-ориентированного программирования как эффективной технологии разработки программного обеспечения микропроцессорных систем управления, предназначенной для различных инженеров, в том числе инженеров-электромехаников, деятельность которых связана с разработкой электроприводов. Предложен подход, основанный на использовании средств модельно-ориентированного программирования для разработки микропроцессорных систем управления электроприводов, который позволяет устранить недостаток компетентности инженера-электромеханика в разработке программного обеспечения систем управления.

Выводы. Предложенный подход способствует продуктивному освоению современной микропроцессорной техники и новейших технологий разработки, становясь эффективным инструментом для самостоятельной разработки инженерами-электромеханиками программного обеспечения систем управления электроприводов без помощи программистов.

Ключевые слова: электропривод, микропроцессорная техника, микропроцессорное управление, системы управления электропривода, модельно-ориентированное программирование, программное обеспечение микропроцессорных систем управления

Igor Sergeevich Polyushchenkov

LLC, Research and Development Company "Rubicon – Innovation", Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Engineer of Department № 36, Russia, Smolensk, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Model-based programming as a technique of electromechanical engineer

Abstract

Background. Modern electric drives with microprocessor control are complex technical systems with software that ensures the coordination of various physical processes for automatic motion control. At the same time, electromechanical engineers have a little knowledge about modern microprocessor technology, expressive and convenient programming languages, as well as modern software development and debugging technologies. Thus, it is difficult for them to develop electric drives independently. In addition, there is a professional gap between electromechanical engineers and programmers, which keeps them from cooperation on the software of electric drives. Nowadays, there are model-based programming tools designed to develop software in graphical form with a description of the built-in microcontroller modules in the form of configurable model blocks. However, the theoretical and practical issues of this technology are still

limited and require development. Thus, the aim to develop model-based programming as a full-fledged technology for control systems development is relevant.

Materials and methods. Electromechanical engineers, on the one hand, and software developers, on the other hand, are the target of the research using the method of system analysis of professional competencies.

Results. The importance of the software for the electric drive microprocessor control systems is considered. The author assesses the capabilities of an electromechanical engineer who has been trained as a bachelor and master's degree student in the field of "Electric Power and Electrical Engineering" as a developer of microprocessor-controlled electric drives. The author describes the model-based programming technique as an effective technology to develop software for microprocessor control systems intended for engineers of different spheres, including electromechanical engineers, whose activities are related to the development of electric drives. The author suggests an approach based on the application of model-based programming technology to develop microprocessor control systems for electric drives. The approach makes it possible to improve the competence of electromechanical engineers in the field of software development of control systems.

Conclusions. Model-based programming technique contributes to the development of modern microprocessor technology and development technologies as an effective tool for independent development of software of electric drive systems by electromechanical engineers without assistance of programmers.

Key words: electric drive, microprocessor technology, microprocessor control, electric drive control systems, model-based programming, software of microprocessor control systems

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.060-070

Введение. Микропроцессорная техника (МПТ) широко распространена в различных технических системах, например электромеханических, электротехнических, теплотехнических, электроэнергетических в связи с ее универсальностью как средства управления. Однако круг разработчиков программного обеспечения (ПО) микропроцессорных систем управления (МПСУ) ограничен. Это связано с тем, что для применения технологий программирования и средств разработки на их основе с учетом специфики микропроцессорной техники требуется особая подготовка и значительный опыт, которых специалисты по названным выше системам, как правило, не имеют. Поэтому под их контролем разработку программного обеспечения осуществляют профессиональные программисты. Помимо увеличения времени, такое выполнение разработки затруднено отсутствием у программистов знаний физических процессов, математического описания и принципов функционирования технических систем. Профессиональный барьер между специалистами-разработчиками приводит к трудностям такого подхода уже при постановке задач, которые специалист по технической системе должен сформулировать в виде, понятном для программиста, и тем более при их решении и анализе результатов. Это в полной мере относится к разработке микропроцессорных систем управления электроприводов (ЭП) и к инженерам-электромеханикам, деятельность которых с ней связана. Как правило, их знания и опыт применения микропроцессорной техники ограничены устаревшей элементной базой и устаревшими средствами и технологиями разработки и отладки программного обеспечения.

Модельно-ориентированное программирование (МОП) [1–3], позволяющее автоматически генерировать программное обеспечение из графических исполнительных моделей, является таким средством разработки, которое позво-

ляет специалисту в предметной области технической системы самостоятельно, без помощи программиста разрабатывать программное обеспечение, опираясь на свои знания и опыт, снижая при этом затраты времени и трудоемкость. Среди средств МОП следует назвать библиотеки Waijung Blockset и Embedded Coder для микроконтроллеров семейства STM32 из состава Matlab.

В настоящее время практика применения МОП представлена различными примерами, как простейшими [1–3], так и более содержательными [2, 4–6]. Однако технические решения, принципиальные для достижения высоких характеристик систем управления и поэтому вызывающие особый интерес, как правило, описываются весьма поверхностно. Детальная оценка известных примеров использования МОП, в том числе анализ автоматически сгенерированного программного обеспечения, позволяет говорить о невысоком уровне примененных в них технических решений. Сказанное в первую очередь относится к компоновке программного обеспечения в виде графической модели в целях обеспечения согласованного выполнения многих задач управления и распределения ограниченных ресурсов микроконтроллера. Поэтому все еще не приходится говорить о существовании полноценной технологии применения МОП как профессионального средства разработки.

В связи с этим актуальным является раскрытие потенциала МОП как полноценного средства разработки программного обеспечения микропроцессорных систем управления, которое расширяет профессиональные возможности специалистов-электромехаников, не имеющих профессионального уровня программирования и использования микропроцессорной техники.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- раскрыть назначение программного обеспечения в микропроцессорном управлении электроприводом с учетом протекания разнообразных физических и информационных процессов;

- исходя из характерного уровня профессиональной подготовки, оценить возможности инженера-электромеханика по разработке программного обеспечения для электроприводов с микропроцессорным управлением, а также возможности повышения его профессионального уровня для выполнения этой разработки;

- оценить значение технологии модельно-ориентированного программирования для расширения возможностей и профессионального уровня инженера-электромеханика при разработке микропроцессорных систем управления электроприводов и их программного обеспечения.

Методы исследования. Рассмотрим назначение программного обеспечения в электроприводе с микропроцессорным управлением, а также оценим возможности и профессиональный уровень инженера-электромеханика как разработчика систем электроприводов и, в частности, их ПО.

Чтобы раскрыть назначение программного обеспечения в управлении электроприводом, следует описать его состав и специфику как объекта управления. Электропривод – это сложная электромеханическая система, в которой осуществляется управляемое обратимое преобразование электрической энергии и механической энергии с учетом КПД [7]. Основной целью функционирования электропривода является управление движением, в том числе стабилизация и ограничение его координат – электромагнитного момента, скорости движения и положения, а также воспроизведение заданных траекторий. При этом физические и управляющие процессы, протекающие в электроприводе, взаимосвязаны с характеристиками применяемых технических средств. Элементами ЭП (рис. 1) являются: электромеханический преобразователь ЭМП, как правило электрическая машина; кинематическая передача (КП); производственный механизм (ПМ) с исполнительным механизмом (ИМ). Система управления (СУ), получающая целевые координаты $\{U_{зy}\}$ от задающего устройства (ЗУ), имеет энергетическую (ЭСУ) и информационную части (ИСУ). Взаимодействие между перечисленными элементами электропривода осуществляется с помощью электрических и механических координат и информационных сигналов, к которым относятся сигналы обратных связей $U_{oc1} - U_{oc3}$ и управляющие сигналы $U_{y1} - U_{y3}$, используемые при автоматическом управлении электроприводом. Среди электрических координат в функциональной схеме на рис. 1 показаны напряжения, токи и частоты питаю-

щей сети U_c, I_c, f_c , а также энергетической части системы управления U_d, I_d, f_d . От двигателя к исполнительному механизму последовательно передаются моменты $M_d, M_{кп}$ и $M_{пм}$, чтобы преодолеть момент нагрузки M_n , а также скорости $\omega_d, \omega_{кп}, \omega_{пм}$, чтобы осуществить движение исполнительного механизма со скоростью ω_n .

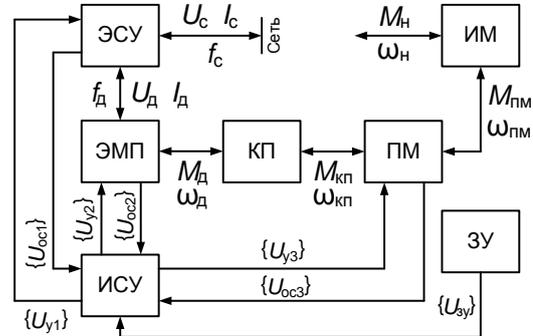


Рис. 1. Функциональная схема электропривода

При достижении цели управления движением для электроприводов характерно выполнение задач, которые можно сгруппировать по уровням – нижнему, среднему и верхнему (рис. 2). Задачи нижнего уровня связаны с используемым типом электрического двигателя и степенью технического совершенства управления им с помощью силового преобразователя, который, в зависимости от типа электрического двигателя, может иметь разнообразные конструкции [8]. К среднему уровню управления отнесены задачи автоматического управления движением, которые лишь косвенно связаны с нижним уровнем управления, так как характерны для электроприводов независимо от типа электрического двигателя. К верхнему уровню отнесены задачи, решение которых позволяет объединить системы управления электроприводов в единый технологический процесс и в более крупные производственные системы.

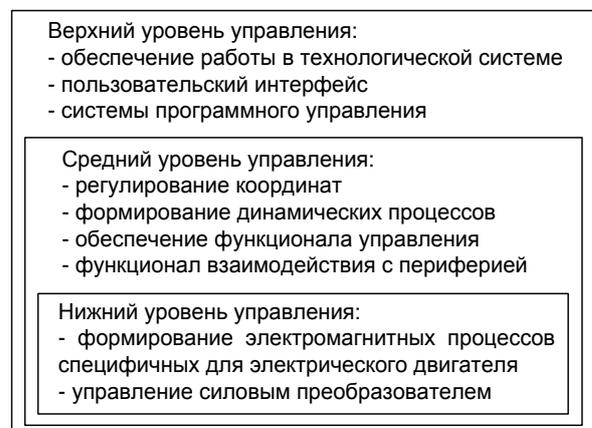


Рис. 2. Задачи управления электроприводом

Исходя из сказанного, очевидным является то обстоятельство, что при микропроцессор-

ном управлении электроприводами назначение программного обеспечения состоит в формировании и координации протекания электрических, электромагнитных, электромеханических и механических процессов для управления движением в реальном времени. Формирование и координация перечисленных выше процессов происходят на основе взаимодействия системы управления с периферийными устройствами путем детектирования, захвата и обработки сигналов от измерительных и задающих устройств, обеспечивающих работу электропривода, а также путем генерирования сигналов (рис. 3).

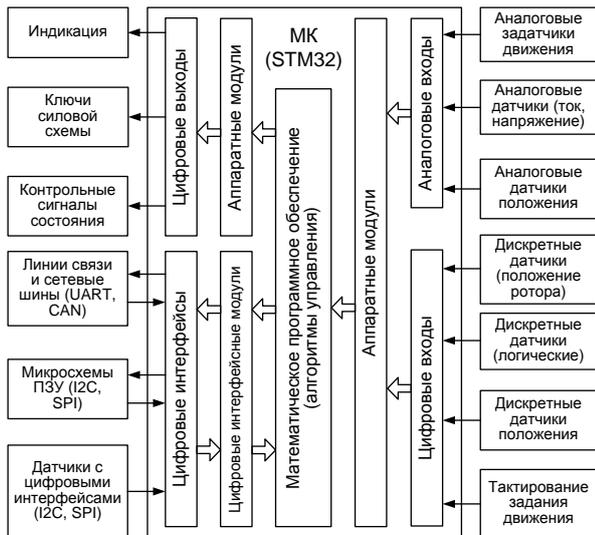


Рис. 3. Функциональная схема электропривода с микропроцессорным управлением

При проектировании электроприводов их программное обеспечение должно быть детально проработано с учетом взаимосвязи протекания физических процессов, свойств аппаратных средств системы управления и вычислительных ресурсов микроконтроллера с ха-

рактеристиками электроприводов, которые требуется обеспечить. Этому способствует применение вычислительных алгоритмов, менее затратных по ресурсам и времени выполнения, и программно-аппаратная реализация технических решений при максимальном использовании модулей, встроенных в микроконтроллер. Также повышению характеристик электроприводов и расширению их функциональности способствует применение структуры программного обеспечения, наиболее рациональной по использованию вычислительных ресурсов микроконтроллера, которые ограничены.

Очевидно, что наиболее компетентными носителями знаний в области электроприводов, а также практического опыта их разработок и применения, являются инженеры-электромеханики. Для того чтобы оценить их возможности по разработке электроприводов с микропроцессорным управлением, рассмотрим примерный уровень их подготовки, а именно, сумму знаний, подкрепленных умением применить их на практике, которые имеет инженер-электромеханик в результате обучения в вузе по профилям бакалавриата и магистратуры «Электропривод и автоматика» направления «Электроэнергетика и электротехника». Что касается электротехники, электроники, электромеханики, а также теории автоматического управления как специального математического аппарата [7], то уровень подготовки этих специалистов примерно соответствует достойному или среднему (рис. 4). Электромеханика включает в себя сумму знаний по электрическим машинам, теории электропривода и ее специальным разделам, а также по системам управления. Это связано с тем, что оборудование в перечисленных областях опирается на неизменные физические принципы, основы теории и математическое описание.



Рис. 4. Сумма знаний инженера-электромеханика

Что же касается микропроцессорной техники и технологий программирования, то имеет место колоссальное отставание от их современного уровня. Как правило, в настоящее время в учебных целях применяется давно устаревшая элементная база микроконтроллеров и микропроцессоров – КР580, Intel8086, Intel8051, восьмибитные микроконтроллеры PIC и AVR, а также устаревшие и крайне непроизводительные технологии разработки и отладки программного обеспечения на основе ассемблеров с минимальным набором инструкций RISC (Reduced Instruction Set Computer). Следует отметить, что ассемблер, как и низкоуровневые средства разработки и отладки, удобны для изучения архитектуры и функционирования микроконтроллеров. Однако разработка и отладка программного обеспечения сложной технической системы, обладающей высокой степенью технического совершенства, на низкоуровневом языке с помощью архаичных отладочных средств затратна по времени, чрезвычайно напряженна, трудоемка и утомительна. Кроме того, очевидно, что устаревшая микропроцессорная техника недостаточна по производительности для современных электроприводов с высокой степенью технического совершенства.

Еще одним недостатком в подготовке инженера-электромеханика следует назвать отсутствие теории и подкрепляющей ее практики по применению цифровых линий связи и сетевых интерфейсов, в их числе UART (Universal Asynchronous Receive-Transmitter), CAN (Controller Area Network), I2C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface), которые позво-

ляют осуществить верхний уровень управления электроприводом [9].

Из сказанного следует, что, даже будучи способным к решению комплекса задач управления на уровне математического описания, алгоритмизации и распределения ресурсов микроконтроллера, инженер-электромеханик сталкивается с трудностями в разработке полноценного и полнофункционального программного обеспечения для системы электропривода. Исходя из этого, на рис. 5 показана примерная схема распределения задач при разработке микропроцессорной системы управления электропривода между электромехаником, электронщиком, конструктором и программистом. Такое разделение связано с большим объемом работы, а также с необходимостью специальных знаний и опыта, которые в комплексе отсутствуют у отдельно взятого специалиста-разработчика. Частичное перекрытие секторов на рис. 5 обозначает задачи, решаемые совместно смежными специалистами. Лишь один из разработчиков, а именно программист, не имеет отдельного сектора с задачами. Электромеханик, являясь для программиста поставщиком задач, должен сформулировать их в понятном для программиста виде вплоть до уровня синтаксических конструкций, самостоятельно осуществив декомпозицию программного обеспечения, распределив аппаратные средства микроконтроллера и назначив приоритетность выполнения задач, что согласуется с распространенной практикой проектирования. Программист же имеет единственную цель – разработать программное обеспечение с учетом целевого микроконтроллера, в точности осуществив замысел электромеханика.



Рис. 5. Разработка микропроцессорной системы управления электропривода

Очевидно, что способность программиста понять задачи, поставленные ему электромехаником, и, не исказив его замысла, разработать программное обеспечение основана на особенностях образования программиста, связанных в первую очередь с содержанием изученных им дисциплин в вузе. Исходя из сказанного, программистов можно разделить на несколько профессиональных групп. К первой группе отнесены программисты, специализирующиеся в области прикладной математики и вычислительных применений программирования, которые не связаны с процессами управления техническими системами и микропроцессорной техникой как средством их осуществления, либо являющиеся специалистами по компьютерному моделированию и инженерным расчетам. Очевидно, что такой объект управления, как электропривод, им неизвестен и к его описанию они подходят абстрактно, исходя из математики, а не специального аппарата теории автоматического управления. Кроме того, таким программистам не знакомы реальные свойства физических сигналов и закономерности протекания электромеханических процессов, а также принципы работы микропроцессорной техники. Ко второй группе отнесены электронщики, которые специализируются на микропроцессорной технике в большей степени, чем на схемотехнике. В значительной степени для таких программистов микроконтроллер является как средством реализации системы управления или обработки информации, так и сам по себе объектом управления. Кроме того, они, как правило, в должной для разработки электроприводов степени не владеют теорией автоматического управления, в том числе ее приложениями для систем управления движением, и рассматривают электрические машины лишь как нагрузку для устройств силовой электроники. Для продуктивной совместной работы от электромеханика потребуются особым образом формулировать частные задачи, чтобы такой программист смог их понять и решить исходя из своих знаний микропроцессорной техники. К следующей, третьей группе отнесены программисты, связанные с информационными технологиями. Как правило, технические системы, в том числе электроприводы, им не знакомы не только на уровне физики, математики и теории автоматического управления, но и на понятийном уровне. Часто они владеют лишь технологиями разработки текста программного обеспечения и поэтому за синтаксическими конструкциями теряют из вида физические принципы, их математическое описание, считая программное обеспечение самоцелью, а не средством осуществления замысла по управлению системой.

Очевидно, что программист, относящийся к любой из перечисленных групп, не может разработать программное обеспечение микропроцессорной системы управления электроприво-

да ни под руководством электромеханика, ни тем более самостоятельно. Между ними имеется профессиональный барьер, который затрудняет постановку задач электромехаником в понятном для программиста виде, а также их решение и оценку результатов. Более того, в процессе решения поставленных электромехаником задач программист может исказить его замысел. Сказанное приводит к выводу о непродуктивности и несостоятельности концепции разработки программного обеспечения электропривода программистом под контролем инженера-электромеханика.

Возможность преодоления указанного профессионального барьера за счет обучения программистов весьма затруднительна. Чтобы понять задачи, сформулированные электромехаником, а затем выполнить их, программист предварительно должен получить значительную сумму знаний, которые имеет инженер-электромеханик (рис. 4), что соизмеримо с прохождением полноценной подготовки в вузе по программам бакалавриата, а затем магистратуры. Естественно, что это невозможно как в связи с узкой направленностью такой подготовки на разработку единичного проекта, так и в связи с большими затратами времени и трудоемкостью. Если обозначенный профессиональный барьер преодолевать за счет обучения электромеханика, то оказывается, что он, будучи способным разложить задачи управления электроприводом до понятного программисту уровня синтаксических конструкций и алгоритмов, вплотную приближается к тому, чтобы разработать программное обеспечение самостоятельно, без помощи программиста. Это ставит под сомнение саму необходимость преодоления обсуждаемого профессионального барьера между электромехаником и программистом при их совместной работе над программным обеспечением – постановке электромехаником задач и их выполнении программистом. Более актуальным и продуктивным выглядит преодоление другого барьера – между электромехаником без знаний и практики применения современной микропроцессорной техники и технологий разработки программного обеспечения и электромехаником, который такие знания и практику имеет. Сказанное в полной мере относится и к другим специалистам, например в области электроэнергетики, теплотехники и некоторых областях электроники. Для них знание микропроцессорной техники и технологий программирования имеет такое же значение, как и для электромеханика при разработке технических систем, начиная с нижнего уровня управления и частично среднего уровня.

Процесс изучения электромехаником микропроцессорной техники и технологий на профессиональном уровне по трудоемкости соизмерим с изучением цикла дисциплин по программам бакалавриата и магистратуры. Он мо-

жет потребовать оценки и самооценки приобретенных знаний и опыта. Например, возникновение задач захвата и генерирования сигналов может потребовать заново обратиться к архитектуре микроконтроллера, а изучение синтаксических конструкций языка программирования может привести к доработке элементов ранее разработанного программного обеспечения.

Чтобы процесс изучения микропроцессорной техники и программирования был продуктивным и содержательным, но занимал меньше времени, он должен обладать следующими свойствами:

- опираться на уже имеющиеся индивидуальные знания и опыт;
- ориентироваться на современную элементную базу микропроцессорной техники и современные средства разработки программного обеспечения;
- ориентироваться на прикладное применение микропроцессорной техники и технологий программирования в конкретной области;
- опираться на взаимосвязь ресурсов и архитектуры целевого микроконтроллера с достижением характеристик и функциональности технических систем.

Очевидно, что распространенные средства разработки программного обеспечения (IAR, Keil, Code Composer Studio, MPLab) в виде структурированного текста на языке высокого уровня не в полной мере соответствуют желаемым свойствам процесса изучения микропроцессорной техники и программирования, перечисленным выше. Без значительной практики применения они неудобны, так как не описывают техническую систему с такой наглядностью, как функциональные и структурные схемы, понятные электромеханику. Кроме того, их применение сопряжено с использованием документации целевых микроконтроллеров и инструкций по языкам их программирования, внушительных по объему и трудоемких по освоению, особенно на начальных этапах. Отдельно следует подчеркнуть, что вхождение в процесс изучения и накопления практики применения технологий программирования специалистами в различных областях зависит от первоначального уровня их знаний и компетенций. Так, электромеханик имеет базовые знания основ микропроцессорной техники (рис. 4), пусть и устаревшей. Специалисты же, например, в электроэнергетике, теплотехнике и некоторых областях электроники таких знаний, как правило, не имеют.

Следует отметить то принципиальное обстоятельство, что в программном обеспечении микропроцессорной системы могут быть выделены два уровня – аппаратно-ориентированное и математическое программное обеспечение. Первое из них специфично для применяемой элементной базы и представлено подпрограммами для инициализации и конфигурирования встро-

енных аппаратных модулей, а также для доступа к ним в процессе функционирования технической системы. Математическое программное обеспечение, специфичное для объекта управления, основано на принципах его функционирования и выражено в форме численных методов математики или логики. Оно зависит от элементной базы в той части, когда требуется сопоставить затраты вычислительных ресурсов на его выполнение с имеющимися ресурсами. Разработка программного обеспечения, связанного с аппаратной спецификой целевого микроконтроллера, у инженера-электромеханика может вызвать наибольшие трудности, в то время как математическое программное обеспечение принципиально алгоритмически ему понятно.

Результаты исследования. Исходя из описанных выше обстоятельств, особое значение, по сравнению с традиционными средствами разработки, имеют средства модельно-ориентированного программирования с автоматическим генерированием текста программного обеспечения, которые используются на основе системы компьютерной математики Matlab, известной разработчикам в различных предметных областях как средство моделирования.

Сказанное в полной мере относится к разработке и разработчикам электроприводов с микропроцессорным управлением. Такими средствами МОП являются библиотеки Embedded Coder и Waijung Blockset для микроконтроллеров STM32 [1–3].

Элементы упомянутого выше аппаратно-ориентированного ПО в этих библиотеках представлены стандартными модельными блоками, которые конфигурируются с помощью меню, снабженных справочной информацией и аналогичных меню блоков Matlab/Simulink. Разработка программного обеспечения в этом случае осуществляется в виде графической исполняемой модели [1–3, 10–12], в которой микропроцессорная реализация учтена применением модельных обработчиков встроенных модулей микроконтроллера (рис. 6). В зависимости от опыта использования МОП, этап разработки компьютерной модели и отладки на ней алгоритмов может не потребоваться.

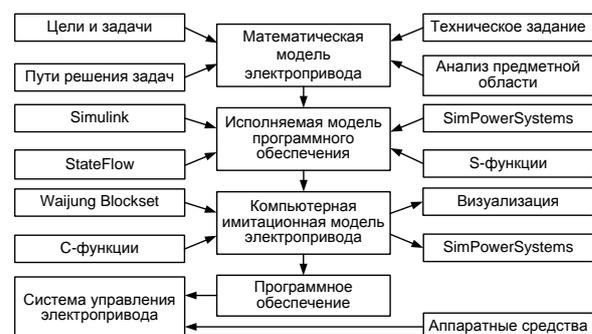


Рис. 6. Блок-схема последовательности модельно-ориентированной разработки

На рис. 7 дана оценка применения технологии модельно-ориентированного программирования по различным критериям, которая в полной мере распространяется и на разработку электроприводов с микропроцессорным управлением. Такая оценка, основанная на обобщении опубликованных материалов [1–6], позволяет сделать вывод об ограниченности практики применения модельно-ориентированного программирования и доступного описания ключевых технических решений, принципиальных для получения характеристик и функциональности технических систем, с учетом аппаратных и вычислительных ресурсов микроконтроллера. На устранение этого пробела, а также на расширение теории и практики МОП путем формирования полноценной технологии его применения и повышения технического уровня разработок направлены публикации [10–12], посвященные различным системам электроприводов (рис. 7). О доступности изучения и применения модельно-ориентированного программирования свидетельствует то обстоятельство, что автор статьи, имея уровень подготовки, соответствующий иллюстрации на рис. 4, и опираясь на имеющиеся у него знания и опыт применения устаревшей микропроцессорной техники, самостоятельно

разработал программное обеспечение для нескольких электроприводов [10–12], имеющих высокую степень технического совершенства.

Если оценивать формирование полноценной технологии применения модельно-ориентированного программирования [10–12] при разработке электроприводов и других сложных систем с микропроцессорным управлением, то следует рассмотреть несколько аспектов. Первый из них связан с компоновкой программного обеспечения, чтобы оно функционировало по принципу операционной системы и диспетчера задач, и с рациональным распределением ресурсов микроконтроллера. На рис. 8 в общем виде показана блок-схема такого программного обеспечения с указанием атрибутов выполнения задач управления, перечисленных на рис. 2. В зависимости от значимости, требуемой интенсивности обновления информации, стабильности периодичности выполнения задач по времени, подпрограммам назначены приоритеты, интервалы повторения, способы вызова и тактирования. При применении МОП программное обеспечение с такой структурой составляется из модельных схем, выполняющих одну или несколько задач управления (рис. 9).



Рис. 7. Практика применения модельно-ориентированного программирования



Рис. 8. Блок-схема программного обеспечения

Модельные схемы, показанные на рис. 9, позволяют проиллюстрировать второй аспект применения технологии МОП. Это применение стандартных модельных блоков и схем из них совместно с пользовательскими подпрограммами на языке C, которые включаются в исполняемую модель с помощью блоков

Basic Custom Code (рис. 9,г) из библиотеки Waijung Blockset, помещенных в управляемые подсистемы Simulink, которые вызываются в зависимости от программных или системных флагов.

Анализ опыта разработок [10–12] позволяет сделать вывод о целесообразности применения пользовательского программного обеспечения, если стандартные модельные блоки и составленные из них схемы громоздки и недостаточно выразительны. Сказанное относится и к случаям, когда автоматически сгенерированное программное обеспечение нерационально по времени выполнения или некорректно выполняется по отношению к замыслу, положенному в основу составления модельных схем. Исходя из сказанного, перспективен принцип, иллюстрация которого дана на рис. 10. Согласно ему, стандартные модельные блоки используются для компоновки структуры программного обеспечения, конфигурирования встроенных модулей микроконтроллера и доступа к ним при выполнении ПО. Использование меню для задания параметров таких модельных блоков упрощается благодаря аналогии с устаревшей микропроцессорной техникой, в значительной мере знакомой инженеру-электромеханику (см. рис. 4).

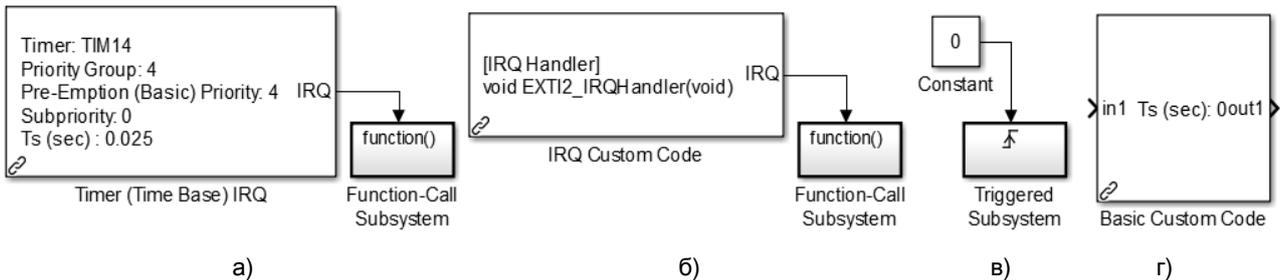


Рис. 9. Модельные элементы компоновки программного обеспечения: а – обработчик прерывания при переполнении таймера; б – обработчик внешнего прерывания; в – обработчик задачи в фоновом цикле; г – модельный блок с пользовательской подпрограммой на языке C

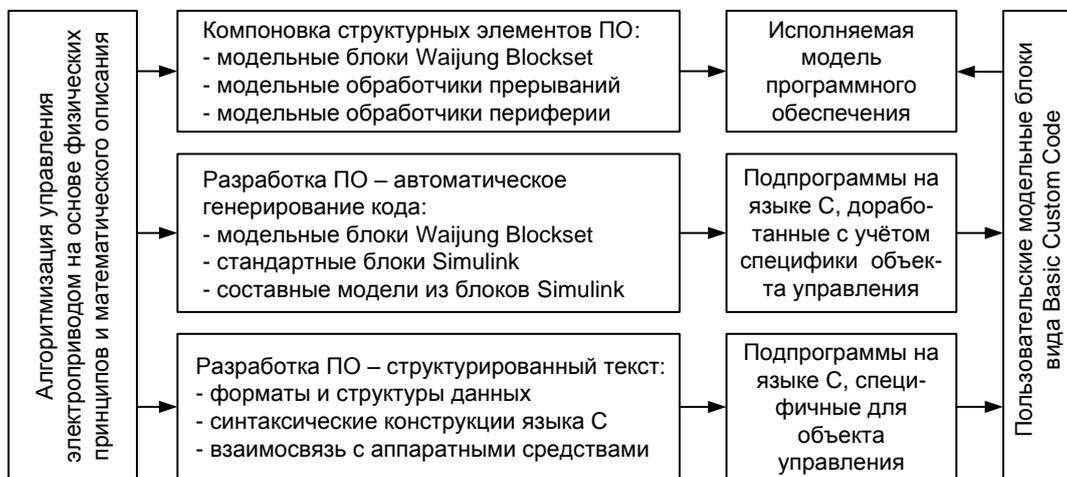


Рис. 10. Сочетание различных технологий при разработке программного обеспечения

Математическое же программное обеспечение в значительной степени разрабатывается на языке С. Описываемое численными методами вычислительной математики, основанное на аппарате теории автоматического управления и различных областях электромеханики, это ПО принципиально понятно инженеру-электромеханику и реализуется на языке С в таком объеме, что его синтаксические конструкции подобны языку Pascal из общего курса информатики. В числе такого математического программного обеспечения подпрограммы регуляторов, задатчиков движения, обработчиков сигналов, получаемых от датчиков, и другие подпрограммы, характерные для систем управления электроприводов. Также возможно редактирование автоматически сгенерированного программного обеспечения в целях его детальной коррекции под требования частных задач управления электроприводом, что вполне доступно инженерам-электромеханикам согласно их профессиональному уровню (рис. 4).

Выводы. Электроприводы с микропроцессорным управлением являются сложными техническими системами, в которых программное обеспечение предназначено для формирования и координации протекания разнообразных физических и информационных процессов в целях управления движением исполнительного механизма в реальном времени с учетом специфики микроконтроллера и ограничений его вычислительных ресурсов и встроенных аппаратных модулей.

Инженеры-электромеханики, имеющие подготовку по электромеханическим профилям бакалавриата и магистратуры, обычно не обладают достаточными знаниями и практикой применения современной микропроцессорной техники и современных технологий программирования для самостоятельной разработки программного обеспечения электроприводов. Концепция, при которой инженер-электромеханик должен объяснить программисту свой замысел, а тот в соответствии с ним разработать программное обеспечение, является непродуктивной из-за наличия профессионального барьера между ними.

Модельно-ориентированное программирование позволяет устранить этот недостаток инженеров-электромехаников и способствует продуктивному освоению ими современной микропроцессорной техники и технологий программирования. В силу этого МОП становится для них эффективным инструментом самостоятельной разработки программного обеспечения без помощи программиста. Это обстоятельство связано с подобием средств МОП и средств имитационного моделирования, а также с описанием встроенных модулей микроконтроллера в виде конфигурируемых модельных блоков, с компоновкой программного обеспечения из мо-

дельных схем и авторских подпрограмм, разработанных на языке С.

Список литературы

1. **Model-Based Design** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mathworks.com (дата обращения 23.05.2022).
2. **Exponenta** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru> (дата обращения 23.05.2022).
3. **Waijung Blockset** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://waijung.aimagin.com> (дата обращения 23.05.2022).
4. **Борисевич А.В., Омельченко Н.В.** Реализация векторного управления асинхронным электродвигателем на микроконтроллере STM32F4 [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 4, Ч. 1. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2014/04/33144> (дата обращения 23.05.2022).
5. **Automatic code generation from Matlab/Simulink for critical applications** / J. Krizan, L. Ertl, M. Bradac, et al. // *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference.* – Canada, 2014. – P. 1–6.
6. **Horvath K., Kuslits M.** Model-Based development of induction motor control algorithms with modular architecture // 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 25–28 Sept. 2016. – Varna, Bulgaria, 2016. – P. 133–138.
7. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
8. **Розанов Ю.К., Соколова Е.М.** Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 272 с.
9. **Денисенко В.В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
10. **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). – М., 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.
11. **Polyuschenkov I.** Development of Control System for Interconnected Electric Drives with Electromechanical Torsion // 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), 2020. – М., 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IWED48848.2020.9069571.
12. **Polyuschenkov I.S.** Model-Based Development of a Servo Tracking Electric Drive // *Russ. Electr. Engin.* – 2021. – Vol. 92. – P. 748–754. <https://doi.org/10.3103/S1068371221120105>.

References

1. Model-Based Design. Available at: www.mathworks.com (Date of appeal 23.05.2022).
2. Exponenta. Available at: <http://www.exponenta.ru> (Date of appeal 23.05.2022).
3. Waijung Blockset. Available at: <http://waijung.aimagin.com> (Date of appeal 23.05.2022).
4. Borisевич, A.V., Omel'chenko, N.V. Realizatsiya vektornogo upravleniya asinkhronnym

elektrovdigatelem na mikrokontrollere STM32F4 [Implementation of an asynchronous electric motor vector control on STM32 microcontroller]. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii*, 2014, no. 4, part 1. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2014/04/33144> (Date of appeal 23.05.2022).

5. Krizan, J., Ertl, L., Bradac, M., Jasansky, M., Andreev, A. Automatic code generation from Matlab/Simulink for critical applications. *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference*. Canada, May 2014, pp. 1–6.

6. Horvath, K., Kuslits, M. Model-Based development of induction motor control algorithms with modular architecture. 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 25–28 Sept. 2016. Varna, Bulgaria, 2016, pp. 133–138,

7. Anuchin, A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.

8. Rozanov, Yu.K., Sokolova, E.M. *Elektronnyye ustroystva elektromekhanicheskikh sistem* [Electronic equipment of electromechanical systems]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 272 p.

9. Denisenko, V.V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of process, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 608 p.

10. 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). Moscow, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.

11. Polyuschenkov, I. Development of Control System for Interconnected Electric Drives with Electromechanical Torsion. 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), 2020. Moscow, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IWED48848.2020.9069571.

12. Polyuschenkov, I.S. Model-Based Development of a Servo Tracking Electric Drive. *Russ. Electr. Engin.*, 2021, vol. 92, pp. 748–754. Available at: <https://doi.org/10.3103/S1068371221120105>

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 536.24.08

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Илья Андреевич Кокулин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Владимир Николаевич Виноградов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-08, e-mail: office@ivenser.com

Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в многоступенчатых многопоточных испарителях мгновенного вскипания

Авторское резюме

Состояние вопроса. Наряду с химическими способами подготовки воды на тепловых и атомных электрических станциях широко используются термические способы, которые имеют ряд экологических и экономических преимуществ. Особое место при термических способах подготовки обессоленной воды занимают многоступенчатые испарительные установки мгновенного вскипания, которые могут использовать низкопотенциальный пар ТЭС. Несмотря на большое количество научных публикаций по данной тематике, эффективное функционирование и совершенствование процесса тепломассообмена в испарительных установках остается актуальной задачей особенно при переменных режимах работы технологического оборудования ТЭС и АЭС. Это связано, с одной стороны, с необходимостью согласования переменных параметров пара с переменными расходами добавочной воды для технологических нужд станции и, с другой стороны, с отсутствием универсальных методик расчета и проектирования данного оборудования. Таким образом, разработка новых методов моделирования и совершенствования тепломассообменных процессов в термических водоподготовительных установках ТЭС и АЭС является актуальной задачей для энергетики и смежных отраслей промышленности.

Материалы и методы. Для решения задач моделирования тепломассообменных процессов в установках мгновенного испарения использованы модели, построенные на уравнениях баланса массы и энергии. Полученные дифференциальные и линейные уравнения решены аналитическими методами и методами математического программирования.

Результаты. Разработана матричная модель процесса тепломассообмена в многоступенчатой многопоточной испарительной установке мгновенного вскипания с учетом испарения части воды при ее попадании в область пониженного давления. Найдено установившееся распределение давления по ступеням и производительность каждой ступени испарительной установки.

Выводы. Сопоставление расчетных и известных результатов показало адекватное описание моделью реального процесса тепломассообмена в испарительных установках мгновенного вскипания, что позволяет ставить и решать задачи по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров оборудования многопоточных испарительных установок. Предложенный метод решения задачи моделирования тепломассообмена обеспечивает возможность одновременного поиска приемлемых значений конструктивных и режимных параметров многоступенчатых испарительных установок различного назначения.

Ключевые слова: математическое моделирование, процесс тепломассообмена, испарительная установка, фазовый переход, многопоточный теплообменник, тепловые электрические станции

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Ilya Andreevich Kokulin

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Vladimir Nikolayevich Vinogradov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-08, e-mail: office@ivenser.com

Modeling and Calculation of Heat and Mass Transfer Process in Multistage Multiflow Flash Evaporators

Abstract

Background. Thermal methods that have several environmental and economic advantages are widely applied for water treatment at thermal (TTP) and nuclear power plants (NPP) along with chemical methods. Multistage flash evaporation plants are important in case of use of thermal methods for desalinated water treatment as they can use low-temperature steam of thermal power plants. Despite the considerable number of scientific papers on this issue, the effective performance and improvement of the heat and mass transfer process in evaporator plants remains an urgent task, especially with variable operating modes of the technological equipment of TPPs and NPPs. On the one hand, it is due to the need to match the variable parameters of steam and the variable flow rates of make-up water for the process needs of the station. On the other hand, it is due to the lack of universal methods to calculate and design the equipment. Thus, the development of new methods to model and improve heat and mass transfer processes in thermal water treatment plants of thermal power plants and nuclear power plants is an urgent task for the power energy industry and related ones.

Materials and methods. To solve the problems of modeling heat and mass transfer processes in flash evaporation plants, models based on the mass and energy balance equations have been used. The obtained differential and linear equations are solved by analytical methods and methods of mathematical programming.

Results. A matrix model of the process of heat and mass transfer in a multi-stage multi-flow evaporative flash installation has been developed, considering evaporation of part of the water when it enters the low-pressure region. The steady-state pressure distribution over the stages and the performance of each stage of the evaporative installation have been found.

Conclusions. Comparison of the calculated and known results have shown an adequate description by means of the model of the real process of heat and mass transfer in flash evaporation plants. It makes possible to set and solve problems to choose the optimal design and operating parameters of equipment for multi-flow evaporation plants. The proposed method to solve the problem of modeling heat and mass transfer provides the possibility of simultaneously search for acceptable values of design and operating parameters of multistage evaporative plants for various purposes.

Key words: mathematical modeling, heat and mass transfer process, evaporation plant, phase transition, multiflow heat exchanger, thermal power plants

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.071-078

Введение. Одним из направлений реализации энерго- и ресурсосберегающих технологий на ТЭС и АЭС является совершенствование систем термической подготовки добавочной воды¹. Термические способы получения очищен-

ной воды обладают целым рядом преимуществ [1–3]: позволяют получить обессоленную воду высокого качества; не требуют использования химических реагентов; нечувствительны к качеству исходной воды; позволяют использовать низкопотенциальные теплоносители [4]. Особое место при термической подготовке воды занимают многоступенчатые многопоточные испарительные установки мгновенного вскипания

¹ РД 34.40.506-85. Методические указания по эксплуатации испарительных установок поверхностного типа тепловых электростанций: разработ. Урал ВТИ.

(МИУМВ) Exerger FVE, которые относятся к новому поколению испарителей мгновенного вскипания вертикального типа с возможной блочной компоновкой оборудования [4]. Использование данной установки позволяет получать обессоленную деаэрированную подогретую воду с жесткостью $J_0 < 1$ мкг-экв, содержанием железа $Fe < 30$ мкг/л, анионов $Na^+ < 20$ мкг/л, катионов $SiO_3^{2-} < 25$ мкг/л, электропроводностью $\alpha < 1$ мкСм/см, пригодную для питания энергетических котлов давлением 14 МПа. По сравнению с химическими методами ВПУ, использование в МИУМВ энергии конденсации пара для нагрева и последующего испарения очищаемой воды позволяет практически не использовать химические реагенты, а по сравнению с установками обратного осмоса, существенно экономить средства на регенерацию и замену расходных материалов. Сам метод требует значительно меньшего расхода тепловой энергии, капитальных и эксплуатационных затрат [3].

Установки мгновенного испарения используют принцип вскипания перегретой воды при ее попадании в область пониженного давления. Эффективная организация процесса тепломассообмена в ступени позволяет использовать тепло конденсации пара для подогрева и испарения циркулирующей очищаемой воды. Совершенствование процесса тепломассообмена, направленное на уменьшение потерь тепла и влаги, является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

Объектом нашего исследования являются тепломассообменные процессы в системах водоподготовки ТЭС и АЭС.

Предмет исследований – моделирование тепломассообмена в многоступенчатой многопоточной испарительной установке и согласование в одной ступени процессов испарения перегретой воды и конденсации полученного пара.

Целью исследования является совершенствование процесса тепломассообмена в многоступенчатой испарительной установке на основе анализа результатов ее математического моделирования.

Методы исследования. Для решения задачи моделирования тепломассообмена с учетом фазового перехода в теплоносителях используются математические модели, построенные на уравнениях баланса массы и энергии [6, 7]. Для решения полученной в ходе моделирования системы линейных и дифференциальных уравнений применяются численные и аналитические методы [7–9].

Результаты. Функционирование систем многопоточных многоступенчатых испарительных установок во многом определяется процессами тепломассообмена в отдельной ступени и структурой схемы объединения этих ступеней в многоступенчатой установке.

Схема потоков теплоносителей и расчетная схема отдельной ступени испарителя представлена на рис. 1. Каждая ступень МИУМВ состоит из двух отсеков: грязного и чистого. Перегретая вода сначала поступает в грязный отсек, в область пониженного давления, где она частично испаряется. Образовавшийся при этом пар направляется через сепаратор влаги в чистый отсек ступени для его конденсации, которая реализуется за счет теплообмена с поступающей на очистку водой. Неиспарившаяся вода из грязного отсека ступени направляется в следующую ступень с пониженным давлением, где процесс повторяется. На рис. 1,а ступень представлена совокупностью грязного и чистого отсеков. Перегретая вода *ПВ* подается сверху в грязный отсек ступени через водораспределительную систему, которая предназначена для формирования развитой поверхности теплообмена. Образовавшийся пар *П* через сепаратор для отделения капель влаги поступает в чистый отсек ступени, где происходит его конденсация за счет теплообмена с охлаждающей водой *ОВ*, которая подается снизу в чистый отсек ступени. Образовавшийся в отсеке дистиллят *Д* стекает вниз и попадает в следующую по ходу движения испаряемой жидкости ступень. Охлаждающая циркулирующая вода движется в противоположном направлении и подается в верхнюю ступень с более высокой температурой пара и конденсата. За счет противоточного характера движения теплоносителей удастся более полно использовать тепло, затраченное на испарение жидкости.

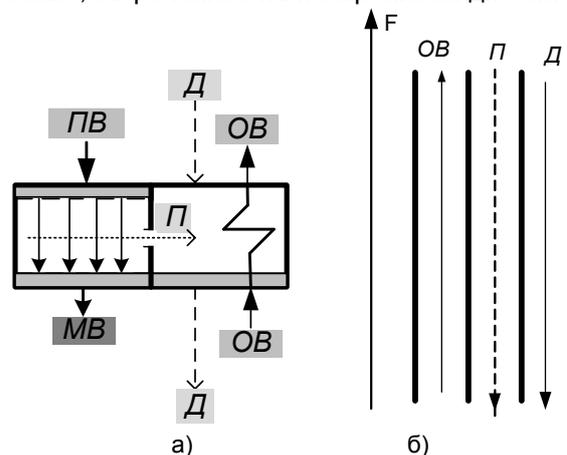


Рис. 1. Схема потоков теплоносителей в ступени испарительной установки (а) и расчетная схема процесса конденсации для чистого отсека (б): ПВ – перегретая вода; ОВ – охлаждающая вода; МВ – минерализованная вода; Д – дистиллят; П – пар

Расчетная схема модели ступени приведена на рис. 1,б. В качестве определяющей координаты процесса выбирается площадь поверхности теплообмена F . Охлаждающая вода движется по направлению оси процесса, а движение потоков пара и дистиллята осуществляется в противоположном направлении.

Между паром и охлаждающей водой происходит теплообмен, который обуславливает конденсацию пара.

Модель ступени представляется совокупностью моделей грязного и чистого отсеков.

Из теплового баланса для грязного отсека произведение перегрева воды $(t_1 - t_{1n}) = \Delta t$ и теплоемкости и расхода воды равно произведению расхода образовавшегося пара и теплоты парообразования:

$$(t_1 - t_{1n})cG_1 = rG_{1p}, \quad (1)$$

где t_1 – температура перегретой воды; t_{1n} – температура насыщения при давлении в ступени; c – удельная теплоемкость; r – удельная теплота парообразования; G_{1p} – расход пара, образовавшегося в грязном отсеке; G_1 – расход перегретой воды на входе в грязный отсек.

В чистом отсеке вдоль выбранной определяющей координаты процесса F происходит конденсация пара и нагрев охлаждающей воды. Модель тепломассообмена в чистом отсеке с учетом фазового перехода при конденсации пара записывается в следующем виде [6]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = (-a_1(t_{1n} - t_2))(-1), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_{1n} - t_2), \end{cases} \quad (2)$$

где x – степень сухости пара; F – площадь поверхности теплообмена; $a_1 = k/r/G_{1p}$, $a_2 = k/c/G_2$; k – коэффициент теплопередачи; G_2 – расход охлаждающей воды; индекс 1 относится к перегретой воде и пару; 2 – к охлаждающей воде.

Общая модель процесса тепломассообмена в двух отсеках ступени в виде решения системы (2) при начальных условиях $x_1(0) = 1$; $t_2(0) = t_{20}$, при условии полной конденсации пара в чистом отсеке и с учетом модели процесса в грязном отсеке (1) записывается после преобразований в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 0 & a_3 & -a_3 & 0 & a_5 \\ 0 & 1-a_4 & a_4 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -r/c \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_{1n} \\ t_{20} \\ t_2 \\ x \end{pmatrix} = 0, \quad (3)$$

где $a_3 = (\exp(-a_2 F) - 1) / a_2$; $a_4 = \exp(-a_2 F)$; $a_5 = rG_1 / k$.

Система (3) из трех линейных уравнений относительно пяти неизвестных дополняется двумя замыкающими соотношениями, с помощью которых можно задать численные значения двух любых параметров. Например, если известны две температуры теплоносителей на входе в ступень ($t_1 = \tilde{t}_1$; $t_{20} = \tilde{t}_{20}$), то выражение (3) записывается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 0 & a_3 & -a_3 & 0 & a_5 \\ 0 & 1-a_4 & a_4 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -r/c \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_{1n} \\ t_{20} \\ t_2 \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где буквенное обозначение с волной показывает известное численное значение соответствующего параметра.

Вводя новые обозначения:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & a_3 & -a_3 & 0 & a_5 \\ 0 & 1-a_4 & a_4 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -r/c \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_{1n} \\ t_{20} \\ t_2 \\ x \end{pmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix},$$

система (4) переписывается следующим образом:

$$\mathbf{B}\mathbf{X} = \tilde{\mathbf{X}}. \quad (5)$$

Выражение (5) является замкнутым описанием ступени испарительной установки, которое будет в дальнейшем использовано для разработки модели многоступенчатой установки и решения проектных задач тепломассообмена [10].

Кроме уноса из грязного отсека влаги в виде пара возможен дополнительный капельный унос жидкости в чистый отсек [4]. Предлагаемая модель (5) не учитывает капельного уноса влаги, т. е. каплеуловитель, установленный между грязным и чистым отсеками, считается идеальным.

Следует отметить, что на практике для повышения эффективности использования тепловой энергии и повышения производительности оборудования испарительные установки выполняются многоступенчатыми. Пример восьмиступенчатой испарительной установки представлен на рис. 2.

Перегретая вода подается в верхнюю ступень, частично переходит в пар, который направляется в чистый отсек для конденсации, а обогащенная минеральными солями и примесями вода $MВ$ направляется в нижний отсек с более низким давлением, для которого поступающая вода является перегретой. В следующей ступени аналогично происходит мгновенное вскипание с образованием пара, который направляется для конденсации в свой чистый отсек. Дистиллят собирается каскадно и стекает в нижние ступени, а из самой нижней ступени удаляется из установки. В грязных отсеках

при ступенчатом упаривании в воде повышается концентрация минеральных примесей. Такая организация процесса упаривания приводит к уменьшению необходимого расхода продувки и сброса минерализованной воды.

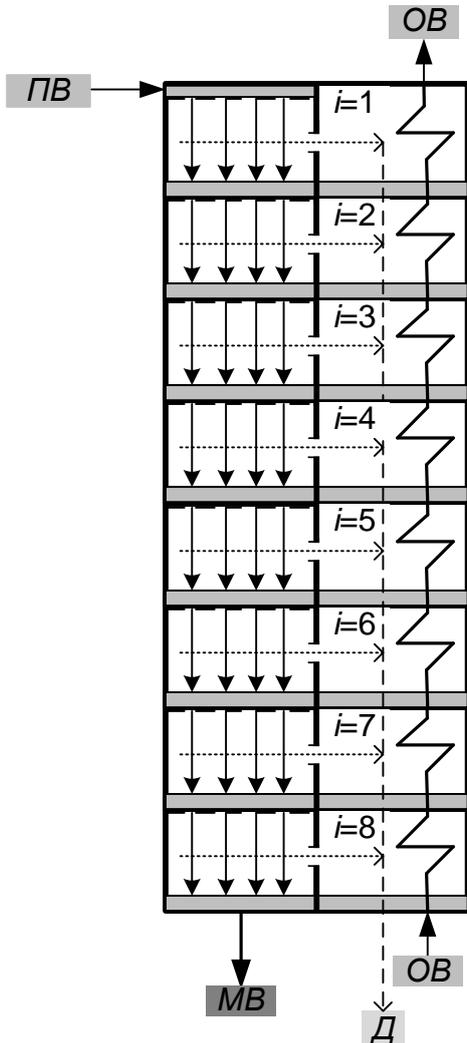


Рис. 2. Схема потоков теплоносителей в многоступенчатой испарительной установке мгновенного вскипания

При составлении модели многоступенчатой установки, число ступеней для которой равно восьми ($n = 8$), для каждой ступени записывается система из пяти уравнений, аналогичных (4). Всего получается $5 \times n = 5 \times 8 = 40$ уравнений, из которых $n \times 3 = 8 \times 3 = 24$ заданы в явном виде согласно (4). Для внутренних потоков теплоносителей формируются согласно условию равенства выходного параметра из ступени входному для следующей по ходу движения теплоносителя ступени еще $(n-1) \times 2 = 7 \times 2 = 14$ уравнений. Для внешних потоков дополнительно задаются значения еще двух известных параметров с помощью еще двух уравнений. Таким образом, число неизвестных (40) равно числу уравнений ($24 + 14 + 2 = 40$) и описание многоступенчатой установки становится за-

мкнутым. В блочном матричном виде данная система записывается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} B_1 & R & O & O & O & O & O & O \\ D & B_2 & R & O & O & O & O & O \\ O & D & B_3 & R & O & O & O & O \\ O & O & D & B_4 & R & O & O & O \\ O & O & O & D & B_5 & R & O & O \\ O & O & O & O & D & B_6 & R & O \\ O & O & O & O & O & D & B_7 & R \\ O & O & O & O & O & O & D & B_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \\ \tilde{X}_3 \\ \tilde{X}_4 \\ \tilde{X}_5 \\ \tilde{X}_6 \\ \tilde{X}_7 \\ \tilde{X}_8 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где B_i – матрица теплообмена в i -й ступени:

$$B_i = \begin{pmatrix} 0 & a_{3i} & -a_{3i} & 0 & a_{5i} \\ 0 & 1 - a_{4i} & a_{4i} & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -r/c \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

R – матрица коммутации между ступенями по охлаждающей воде:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix};$$

D – матрица коммутации между ступенями по перегретой воде:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

O – нулевая матрица:

$$O = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

X_i – вектор неизвестных параметров для i -й ступени:

$$X_i = \begin{pmatrix} t_{1i} \\ t_{ni} \\ t_{20i} \\ t_{2i} \\ x_i \end{pmatrix};$$

\tilde{X}_i – вектор известных параметров внешних потоков, подаваемых в i -ю ступень установки. Для многоступенчатой испарительной установ-

ки, представленной на рис. 2, в качестве таких параметров используются температура перегретой воды для первой ступени и температура охлаждающей воды для последней ступени.

Поясним алгоритм ввода в расчетную модель значений температур известных внешних потоков. Используя обозначения:

$$K = \begin{pmatrix} B_1 & R & O & O & O & O & O & O \\ D & B_2 & R & O & O & O & O & O \\ O & D & B_3 & R & O & O & O & O \\ O & O & D & B_4 & R & O & O & O \\ O & O & O & D & B_5 & R & O & O \\ O & O & O & O & D & B_6 & R & O \\ O & O & O & O & O & D & B_7 & R \\ O & O & O & O & O & O & D & B_8 \end{pmatrix},$$

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \end{pmatrix}, \quad \tilde{X} = \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \\ \tilde{X}_3 \\ \tilde{X}_4 \\ \tilde{X}_5 \\ \tilde{X}_6 \\ \tilde{X}_7 \\ \tilde{X}_8 \end{pmatrix},$$

перепишем выражение (6) в виде

$$KX = \tilde{X}, \quad (8)$$

где K – матрица процесса тепломассообмена размером $n \times n$ блоков или $5n \times 5n$ элементов в многоступенчатой установке с учетом коммутации ступеней между собой; X – вектор искомых параметров процесса тепломассообмена размером $n \times 1$ блоков или $5n \times 1$ элементов в установке; \tilde{X} – вектор известных параметров внешних потоков размером $n \times 1$ блоков или $5n \times 1$ элементов в установке. Для схемы, представленной на рис. 2, вектор \tilde{X} будет иметь только два ненулевых элемента, соответствующих температуре перегретой воды на входе в первую ступень и температуре охлаждающей воды на входе в последнюю ступень согласно (4), (6).

Уравнение модели (8) представляет собой систему из 40 линейных уравнений, решение которой позволяет определить соответственно 40 искомых величин. Решая систему методом обращения матриц [8], запишем вектор искомых величин в виде

$$X = K^{-1}\tilde{X}, \quad (9)$$

где возведение матрицы в степень (-1) соответствует ее обращению.

Исходные данные для проведения численных расчетов многоступенчатой испарительной установки представлены в таблице.

Исходные данные для расчета

Наименование параметра	Значение параметра теплоносителей	
	охлаждающая вода	перегретая вода
Расход воды G , т/ч	502	502
Температура воды на входе t , °C	45	101
Теплоемкость c , кДж/кг К	4,187	4,187
Скрытая теплота парообразования r , кДж/кг	2 200	2 200

В ходе решения системы линейных уравнений (9) определяются температуры охлаждающей воды и пара, а также доли или производительности по пару и дистилляту в каждой ступени. Результаты расчетного анализа для восьмиступенчатой испарительной установки представлены на рис. 3 в виде зависимости температур перегретой и охлаждающей воды и расхода полученного дистиллята от номера ступени при варьировании расхода охлаждающей воды.

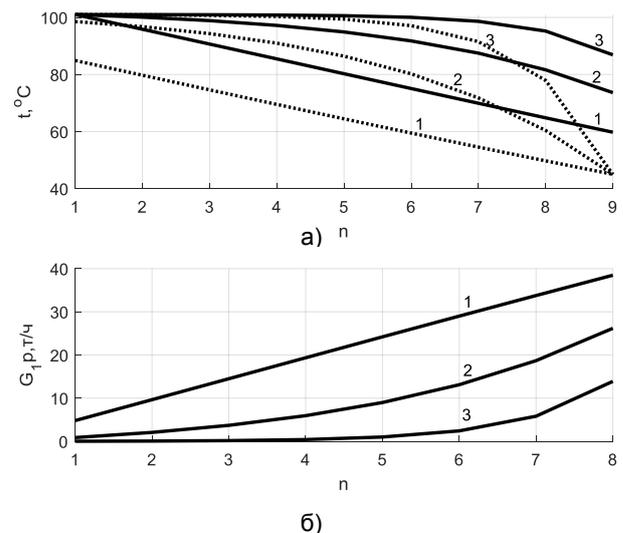


Рис. 3. Зависимость температуры перегретой (сплошная линия) и охлаждающей воды (пунктирная линия) (а) и расхода дистиллята (б) от номера ступени при разных расходах охлаждающей воды: 1 – 502 т/ч; 2 – 251 т/ч; 3 – 126 т/ч

Согласно представленным результатам, при уменьшении расхода охлаждающей воды с 502 до 126 т/ч производительность установки по дистилляту существенно снижается с 85 до 14 т/ч. Таким образом разработанный подход и полученные результаты позволяют оценивать количество испаренной влаги и рассчитывать производительность испарительной установки для каждой ступени при варьировании расхода охлаждающей воды, что является важным технологическим показателем и позволяет оценивать работоспособность или проек-

тировать испарительные установки для различных режимов работы.

Для проверки достоверности модели выполнены дополнительные расчетные исследования влияния температуры охлаждающей воды на процесс тепломассообмена в МИУМВ. На рис. 4 представлены результаты анализа влияния температуры охлаждающей воды на входе в установку на профиль температур теплоносителей в ступенях установки. Расчетный анализ показал, что снижение указанной температуры с 60 до 22 °С существенно повышает производительность установки по дистилляту с 28 до 55 т/ч, что хорошо совпадает с опубликованными результатами [3, 4, 5] и подтверждает достоверность предложенной модели.

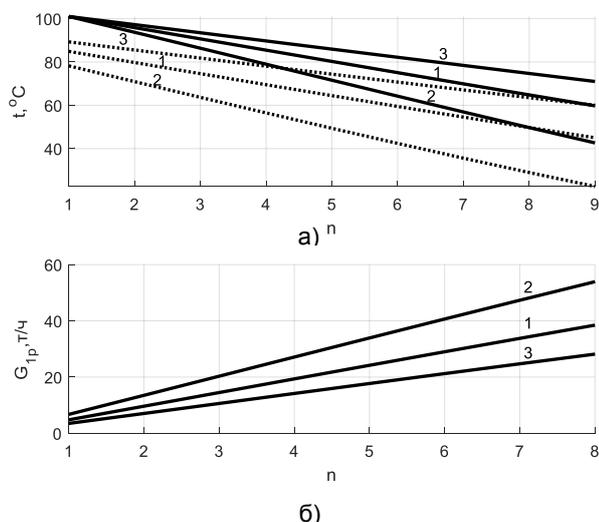


Рис. 4. Зависимость температуры перегретой (сплошная линия) и охлаждающей воды (пунктирная линия) (а) и расхода дистиллята (б) от номера ступени при разных температурах охлаждающей воды: 1 – 45 °С; 2 – 22,5 °С; 3 – 60 °С

На практике для повышения энергоэффективности процесса тепломассообмена применительно к МИУМВ часто применяются многоступенчатые испарительные установки в двухкорпусном исполнении, что позволяет более полно использовать тепловую энергию и уменьшить расход продувочной воды [3]. Следует отметить, что применение многокорпусных и многоступенчатых установок связано с ростом эффективности работы установки [3], с одной стороны, и с увеличением габаритов и стоимости установки, с другой. Приведенная математическая модель позволяет ставить и решать оптимизационные задачи по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров работы оборудования, выбирать экономически обоснованные конструкции и режимы работы оборудования МИУМВ.

Выводы. Разработанная модель процесса тепломассообмена применительно к многоступенчатым испарительным установкам мгновенного вскипания позволяет формулировать и

решать задачи по эффективной организации процессов тепломассообмена в МИУМВ различного назначения, что служит, в свою очередь, основой для постановки и решения задач по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров ВПУ с МИУ.

Список литературы

1. Назмиев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
2. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1 / пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
3. Мошкарин А.В., Мошкарин А.А. Анализ схем испарительных установок тепловых электростанций. – Иваново, 2007. – 271 с.
4. Термообессоливающая установка Exerger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf> [дата доступа 08.11.2022].
5. Матричная формализация расчета многоступенчатой испарительной установки мгновенного вскипания / В.П. Жуков, А.В. Мошкарин, Е.В. Барочкин и др. // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2003. – С. 182.
6. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973. – 500 с.
9. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.
10. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва и др. // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 62–69.

References

1. Nazmiev, Yu.G., Lavygin, V.M. *Teploobmennyye apparaty TES* [Heat exchangers of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 288 p.
2. Martynenko, O.G. *Spravochnik po teploobmennikom v 2 t. T. 1* [Handbook of heat exchangers in 2 vol., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
3. Moshkarin, A.V., Moshkarin, A.A. *Analiz skhem isparitel'nykh ustanovok teplovykh elektrostantsiy* [Analysis of schemes of evaporation plants of thermal power plants]. Ivanovo, 2007. 271 p.
4. *Termoobessolivayushchaya ustanovka Exerger* [Exerger Thermal desalination plant]. Available at: <https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf> [data dostupa 08.11.2022].
5. Zhukov, V.P., Moshkarin, A.V., Barochkin, E.V., Moshkarin, A.A., Andronov, A.A. *Matrichnaya formalizatsiya rascheta mnogostupenchatoy isparitel'noy ustanovki mgnovennogo vskipaniya* [Matrix formalization of the calculation of a multi-stage evaporative installation of instantaneous boiling]. *Sostoyaniye i perspektivy*

razvitiya elektrotekhnologii (XI Benardosovskiye chteniya) [Current state and trends of development of electrical and thermal technologies (XI Benardos Readings)]. Ivanovo, 2003, p. 182.

6. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

7. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operation Research: Objectives, Principles, Methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.

8. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 500 p.

9. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka, 1981. 488 p.

10. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Bobrova, M.S., Belyakov, A.N., Shuvalov, S.I. *Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v teploobmennykh apparatakh* [Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 62–69.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **11**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 10 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черными**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **11**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 1

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 9.02.2023. Выход в свет 28.02.2023. Формат 60x84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 10,1. 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, 39, строение 8.