



Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2025 / Вып. 3

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, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, А.А. Борисов, С.Д. Горшенин. Сведение материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности ГТУ с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей.....**5**

А.А. Ахмед, П.А. Трубаев. Исследование режимов горения RDF-топлива в котле малой мощности при изменении влажности топлива и коэффициента избытка воздуха.....**13**

А.В. Нуждин, Н.Ю. Курнакова, И.В. Янченко. Повышение энергетической эффективности ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76 за счет комплексного использования вторичных энергоресурсов.....**22**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

М.В. Двойненко, В.А. Шуин. Исследование на имитационной модели параметров режима самозапуска электродвигателей комплексной нагрузки, учитываемых при выборе уставок релейной защиты линий высокого напряжения.....**28**

С.О. Хомутов, И.В. Белицын, А.С. Сабельников, О.А. Степанов, Н.А. Литвинова, Ю.К. Шлык. Синтез альтернатив по внедрению энергоэффективных трансформаторов.....**39**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

М.А. Захаров, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, И.Н. Сулыненков, А.А. Скоробогатов. Применение преобразователя частоты для диагностики асинхронных двигателей методом спектрального анализа тока статора.....46

А.Н. Голубев. Многофазный электропривод переменного тока с улучшенными виброшумовыми характеристиками.....61

В.Н. Караулов, Е.А. Курлаков. Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой в установившихся и переходных режимах.....66

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.Р. Колганов, О.В. Крюков, С.Е. Степанов. Автоматизированное прогнозирование ресурса мощных электроприводов турбоустановок на компрессорных станциях.....73

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

М.Д. Фомичев, В.П. Жуков, С.Д. Горшенин, В.Ф. Очков, Е.В. Барочкин. Учет влияния направления и скорости ветра при решении прямых и обратных задач тепломассообмена в башенных градирнях.....80

А.Н. Лабутин, А.А. Андреенков, Е.А. Шуина. Синергетический синтез алгоритмов управления экстремальными объектами.....86

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования 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).



Ivanovo State Power Engineering University

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

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2025 / Issue 3

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, Candidate of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.B. Kapranova, Doctor of Physics and Mathematics
(Yaroslavl)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.V. Mitrofanov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.Yu. Murzin, Candidate of Engineering (Ivanovo)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Yu. Tarshis, Doctor of Engineering (Yaroslavl)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

The issue is prepared by:

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

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office
Technical Editor
Editor

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

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

A.S. Zinovieva, G.V. Ledukhovskiy, V.P. Zhukov, A.A. Borisov, S.D. Gorshenin. Simultaneous equations method of material and energy balances when calculating actual indicators of thermal efficiency of gas turbine units taking into account the uncertainty of the results of measuring thermophysical parameters of heat carriers.....**5**

A.A. Ahmed, P.A. Trubaev. Study of RDF combustion modes in a small capacity boiler when changing fuel moisture content and excess air ratio..... **13**

A.V. Nuzhdin, N.Yu. Kurnakova, I.V. Yanchenko. Increasing energy efficiency of gas turbine unit of GPA-Ts-16/76 gas pumping unit due to integrated use of secondary energy resources.....**22**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

M.V. Dvoynenkov, V.A. Shuin. Study of self-starting mode parameters of complex load electric motors on a simulation model taken into account when selecting relay protection settings of high-voltage transmission lines.....**28**

S.O. Khomutov, I.V. Belitsyn, A.S. Sabelnikov, O.A. Stepanov, N.A. Litvinova, Yu.K. Shlyk. Synthesis of alternatives for implementing energy efficient transformers.....**39**

ELECTROMECHANICS

M.A. Zakharov, A.S. Strakhov, E.M. Novoselov, D.A. Polkoshnikov, I.N. Sulynenkov, A.A. Skorobogatov. Application of frequency converter to examine induction motors using spectral analysis method of stator current.....**46**

A.N. Golubev. Multiphase AC electric drive with improved vibration-noise characteristics.....**61**

V.N. Karaulov, E.A. Kurlakov. Parametric model of synchronous reluctance motor with a TLA-rotor and damper winding in steady-state and transient modes.....**66**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

A.R. Kolganov, O.V. Kryukov, S.E. Stepanov. Automated forecasting of the resource of powerful electric turbine drives at compressor stations.....**73**

MATHEMATICAL METHODS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY

M.D. Fomichev, V.P. Zhukov, S.D. Gorshenin, V.F. Ochkov, E.V. Barochkin. Considering the influence of wind direction and speed when solving direct and inverse problems of heat and mass transfer in cooling towers.....**80**

A.N. Labutin, A.A. Andreenkov, E.A. Shuina. Synergetic synthesis of control algorithms for extreme objects.....**86**

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 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialties: 2.3.3. Automation and Control of Technological Processes and Production; 2.3.7. Computer Simulation and Computer-Aided Design; 2.4.2. Electrotechnical Complexes and Systems; 2.4.3. Electric 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

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, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Антон Александрович Борисов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, начальник отдела координации инновационной деятельности, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-98-77, e-mail: borisov@ispu.ru

Сергей Дмитриевич Горшенин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin_tes@ispu.ru

Сведение материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности ГТУ с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей

Авторское резюме

Состояние вопроса. Известна скалярная и векторная постановки задачи регуляризации материальных потоков при расчете фактических показателей тепловой экономичности применительно к газотурбинным установкам, основанные на концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач. Получены аналитические и численные решения задачи, позволяющие учесть ограничения на область допустимых значений расходов теплоносителей, обусловленные метрологическими характеристиками используемых средств измерения. Однако во всех указанных случаях энтальпии теплоносителей, зависящие от их теплофизических параметров, в частности давления и температуры, считаются заданными. Учет неопределенности результатов измерения теплофизических параметров позволит дополнительно повысить степень обоснованности результатов сведения материальных и энергетических балансов газотурбинных установок.

Материалы и методы. Задача сведения материального и энергетического балансов газотурбинной установки с учетом неопределенности результатов измерения теплофизических параметров теплоносителей формулируется в рамках концепции регуляризации Тихонова. Для численного решения задачи используется метод статистического программирования. Апробация результатов работы выполнена с использованием эксплуатационных данных по газотурбинной установке GTX-100.

Результаты. Получены решения сформулированной задачи сведения материального и энергетического балансов газотурбинной установки с учетом обусловленных метрологическими характеристиками средств измерения ограничений на область допустимых значений расходов и теплотехнических параметров теплоносителей и электрической мощности. Выполнено сопоставление различных вариантов постановки и решения задачи. Установлено их влияние на результаты расчета показателей тепловой экономичности газотурбинных установок.

Выводы. Предложенная методика сведения балансов позволяет дополнительно повысить степень достоверности результатов расчета фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок по сравнению со скалярной и векторной постановками задачи при неизменных значениях теплофизических параметров теплоносителей. Методика применима как при разработке нормативных энергетических характеристик оборудования, в том числе при обработке результатов тепловых балансовых испытаний, так и при оперативном контроле эксплуатируемых установок.

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

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

Grigory Vasilievich Ledukhovskiy

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

Anton Alexandrovich Borisov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Coordination of Innovation Activities Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-98-77, e-mail: borisov@ispu.ru

Sergei Dmitrievich Gorshenin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin_tes@ispu.ru

Simultaneous equations method of material and energy balances when calculating actual indicators of thermal efficiency of gas turbine units taking into account the uncertainty of the results of measuring thermophysical parameters of heat carriers

Abstract

Background. To calculate actual indicators of thermal efficiency in respect to gas turbine units, scalar and vector formulations of the problem of regularization of material flows are used. They are based on the concept of Tikhonov's regularization when solving ill-posed problems. Analytical and numerical solutions of the problem have been obtained. It allows us to take into account the limitations on the range of permissible values of coolant flow rates, due to the metrological characteristics of the measuring instruments used. However, in the cases mentioned, the coolants enthalpy, depending on their thermophysical parameters, in particular pressure and temperature, are considered to be given. Taking into account the uncertainty of the results of measuring thermophysical parameters will make it possible to further increase the degree of validity of the results of simultaneous equations of the material and energy balances of gas turbine units.

Materials and methods. The problem of simultaneous equations of material and energy balances of a gas turbine unit taking into account the uncertainty of the results of measuring the thermal and physical parameters of coolants is set within the framework of Tikhonov's regularization concept. The statistical programming method is used for the numerical solution of the problem. The results have been tested using operational data on the GTX-100 gas turbine unit.

Results. The solutions to the problem of simultaneous equations of material and energy balances of a gas turbine unit have been obtained, taking into account the limitations on the range of permissible values of flow rates and heat engineering parameters of coolants and electric power, determined by the metrological characteristics of the measuring instruments. The authors have studied various options for setting and solving the problem and their influence on the results of calculating the thermal efficiency indicators of gas turbine units.

Conclusions. The proposed simultaneous equations method allows us to further increase the degree of reliability of the results of calculating the actual indicators of thermal efficiency of gas turbine units in comparison with the scalar and vector formulation of the problem at constant values of the thermal physical parameters of coolants. The method is applicable both to develop output performance standards of equipment, including processing the results of thermal balance tests, and to monitor operating units.

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

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.005-012

Введение. В соответствии с требованиями нормативных документов энергетической отрасли¹, расчету фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности оборудования тепловых электрических станций (ТЭС) за отчетный период должно предшествовать сведение материальных и энергетических балансов по энергоустановкам и электростанции в целом. В ходе этой процедуры результаты измерения параметров потоков теплоносителей корректируются в пределах нормируемой погрешности используемых средств измерения для обеспечения их взаимной увязки и соответствия балансам массы и энергии. При этом от используемой методики сведения балансов существенно зависит степень достоверности определяемых впоследствии показателей тепловой экономичности и составляющих резерва тепловой экономичности [1–3]. В отличие от паротурбинных ТЭС, для которых утверждена нормативная методика сведения балансов², по газотурбинным (ГТУ) и парогазовым (ПГУ) установкам ТЭС таких требований в нормативных документах не зафиксировано. Поэтому на практике сведение балансов по таким объектам либо не выполняется, либо осуществляется с использованием экспертных оценок, различающихся для разных ТЭС. Такое положение приводит к ошибкам в оценке технического состояния и уровня эксплуатации оборудования.

В предложенной ранее [4, 5] методике совместного сведения материального и энергетического балансов применительно к газотурбинным установкам (ГТУ), основанной на концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач [6–8], энтальпия каждого из потоков теплоносителей, зависящая от их теплофизических параметров, в частности давления и температуры, считалась заданной. Учет неопределенности результатов измерения теплофизических параметров позволит дополнительно повысить степень обоснованности ре-

зультатов сведения материальных и энергетических балансов ГТУ.

Методы исследования. В рассматриваемой расчетной схеме ГТУ (рис. 1) воздух после компрессора 1 подается в камеру сгорания 2 вместе с топливом (природным газом), затем продукты сгорания направляются в газовую турбину 3. ГТУ имеет одновальное исполнение: турбогенератор 4 располагается на одном валу с турбиной 3 и компрессором 1.

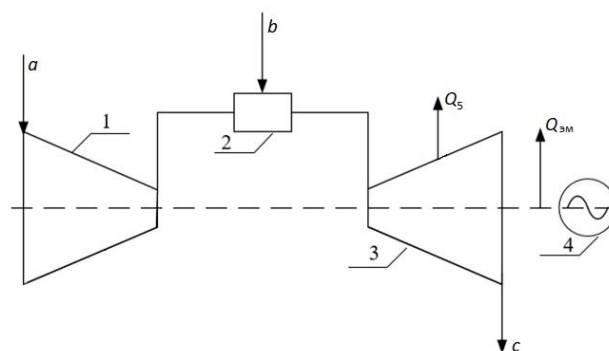


Рис. 1. Принципиальная схема ГТУ: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина; 4 – турбогенератор; а – подвод воздуха; b – подвод топлива; с – отвод продуктов сгорания; прочие обозначения приведены в тексте

Исследование проводится в несколько этапов.

На первом этапе выполняется анализ чувствительности результатов ранее полученного решения задачи регуляризации в векторной постановке к вариациям значений теплотехнических параметров, которые ранее считались заданными.

На втором этапе формулируется задача регуляризации теплотехнических параметров, которые ранее считались заданными при выполнении расчетов.

На третьем этапе разрабатывается метод численного решения задачи регуляризации с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров, выполняется анализ полученных результатов.

Результаты исследования. Выполним оценку чувствительности результатов решения задачи регуляризации в векторной постановке к вариациям значений теплотехнических параметров теплоносителей. Для этого в рамках полученного ранее решения задачи [5] на при-

¹ РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: разраб. АО «Фирма ОРГРЭС».

² СО 153-34.09.110. Руководящие указания по ведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: разраб. ОРГРЭС.

мере фактического режима работы ГТУ типа GTX-100 проведем дополнительные расчетные исследования. Основные соотношения постановки и решения задачи регуляризации в векторной постановке, согласно [5], которые использовались при проведении расчетного анализа, записываются в виде

$$F(\mathbf{Y}, \lambda) = |\mathbf{A}\mathbf{Y} - \mathbf{B}|^2 + |\lambda(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0)|^2 \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где $F(\mathbf{Y}, \lambda)$ – целевая функция регуляризации; λ – диагональная матрица параметров регуляризации; $\mathbf{B} = 0$; \mathbf{Y} и \mathbf{Y}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка соответственно; \mathbf{A} – известный матричный оператор модели

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

где $h_{\text{топл}}^{\text{и}}$, $h_{1\text{к}}^{\text{и}}$, $h_{2\text{т}}^{\text{и}}$ – энтальпии топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной (определяются по измеренным значениям параметров теплоносителей), МДж/кг; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ (принимается по данным коммерческого учета), МДж/кг; индекс «и» указывает на соответствие параметра результату изменения; $\eta_{5\text{т}}$ характеризует тепловые потери от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханические потери ГТУ и определяется из соотношения

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

где Q_5 и $Q_{\text{эм}}$ – мощность тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь ГТУ (определяются по результатам экспертной оценки [2]), МВт; $N_{\text{ГТУ}}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт;

$$\mathbf{Y} = (B_{\text{КС}} \quad G_{1\text{к}} \quad G_{2\text{т}} \quad N_{\text{ГТУ}})^T, \quad (3)$$

где $B_{\text{КС}}$, $G_{1\text{к}}$ и $G_{2\text{т}}$ – расходы топлива в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор и продуктов сгорания на выходе из турбины, кг/с; индекс «Т» указывает на транспонирование матрицы.

Аналитическое решение задачи (1), полученное ранее [5], записывается в виде

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^2 \mathbf{E})^{-1} \lambda^2 \mathbf{Y}_0, \quad (4)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица; индекс «-1» указывает на обращение матрицы.

Аналитическое решение (4) на первом этапе исследования используется для оценки чувствительности решения к возмущению по значениям теплотехнических параметров матрицы \mathbf{A} , которые ранее [5] считались постоянными.

На рис. 2 приведены результаты оценки чувствительности решения (4) к возмущению значений $h_{2\text{т}}^{\text{и}}$ (сплошная линия), $\eta_{5\text{т}}$ (штриховая линия), а также $h_{\text{топл}}^{\text{и}}$ и $h_{1\text{к}}^{\text{и}}$ (пунктирная линия).

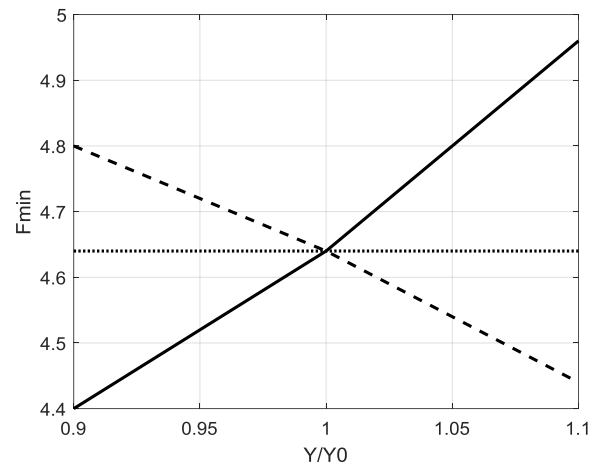


Рис. 2. Чувствительность решения (4) к варьированию значений параметров матрицы \mathbf{A} : F_{\min} – целевая функция (1), соответствующая решению (4); Y/Y_0 – относительное отклонение исследуемого параметра матрицы \mathbf{A} ; прочие обозначения приведены в тексте

Анализ приведенных на рис. 2 результатов исследования показывает, что теплотехнические параметры $h_{2\text{т}}^{\text{и}}$ и $\eta_{5\text{т}}$ значимо влияют, а параметры $h_{\text{топл}}^{\text{и}}$ и $h_{1\text{к}}^{\text{и}}$ практически не оказывают влияния на решение задачи и значение целевой функции регуляризации. Таким образом, выявлены параметры, неопределенность при измерении (в том числе, косвенном, как в случае с $\eta_{5\text{т}}$) которых целесообразно учитывать с точки зрения точности результатов получаемого решения задачи совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ.

На втором этапе исследований предлагается модель и методика последовательной регуляризации: сначала решается задача (1)–(4) аналогично ранее представленной векторной регуляризации [5], затем формулируется новая задача регуляризации для теплотехнических параметров, для которых регуляризация на первом этапе не проводилась.

Для этого после регуляризации согласно (1)–(4) формируется новая целевая функция и формулируется новая задача регуляризации, где найденные на первом этапе параметры считаются известными, а известные на первом этапе теплотехнические параметры уточняются на втором этапе решения задачи. Формулировка задачи регуляризации теплотехнических параметров записывается в следующем виде:

$$F_1(\mathbf{Y}_1, \lambda_1) = |\mathbf{A}_1 \mathbf{Y}_1|^2 + |\lambda_1 (\mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_{1,0})|^2 \Rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_1 = (B_{\text{КС}} \quad G_{1\text{к}} \quad G_{2\text{т}} \quad N_{\text{ГТУ}}); \quad (6)$$

$$Y_1 = \left(h_{\text{топл}}^n + Q_{\text{н}}^p \quad h_{1\text{к}}^n \quad -h_{2\text{т}}^n \quad -\frac{1}{\eta_{5\text{т}}} \right)^T, \quad (7)$$

где $F_1(Y_1, \lambda_1)$, Y_1 , λ_1 и A_1 – целевая функция, вектор искомых параметров, матрица параметров регуляризации и матрица известных параметров, полученные на втором этапе решения задачи регуляризации.

Решение задачи (5)–(7) получено аналогично (4), но с уточненным видом и структурой матриц:

$$Y_1 = (A_1^T A_1 + \lambda_1^2 E)^{-1} \lambda_1^2 Y_{1,0}. \quad (8)$$

Результаты расчета, проведенного в соответствии с (8) для второго этапа при одинаковых значениях ненулевых элементов матрицы λ_1 , приведены на рис. 3 в виде зависимостей квадрата небаланса энергии (а), энтальпии топлива (б), энтальпии воздуха перед компрессором (в), обобщенной характеристики тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь $1/\eta_{5\text{т}}$ (г, 1) и энтальпии газов за турбиной (г, 2) от коэффициента регуляризации λ .

Анализ данных, представленных на рис. 3, показывает, что второй, дополнительный этап регуляризации по значениям теплотехнических параметров в соответствии с (5)–(8) не привел к значимому изменению результата сведения балансов по сравнению с решением задачи регуляризации согласно (1)–(4).

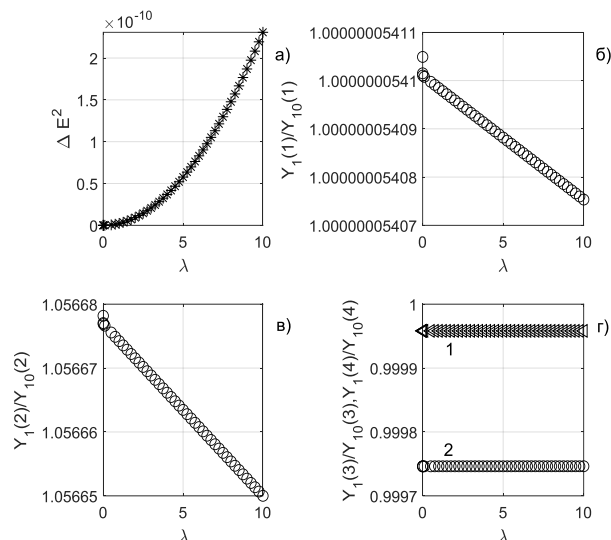


Рис. 3. Результаты второго этапа регуляризации в виде зависимостей от параметра регуляризации λ : а – квадрата небаланса энергии; б – энтальпии топлива; в – энтальпии воздуха перед компрессором; г – обобщенной характеристики тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь (1) и энтальпии газа за турбиной (2)

На третьем этапе исследований предложено учитывать теплотехнические параметры при численном решении задачи регуляризации. Объединение двух первых этапов за счет учета метрологических ограничений выполняется при оценке диапазона варьирования измеренных значений параметров (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчетов для контрольного режима при различных вариантах постановки и решения задачи регуляризации*

Обозначение, единица измерения	Априорные значения Y_{0i}	Метрологические ограничения $[Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$	Регуляризованные значения Y_i				
			вариант С [1] ($\lambda = 0,95$)	векторная постановка			
				вариант В-1 ($\lambda_i = \lambda^* = 1,04$)	вариант В-2 / значение λ_i	вариант В-3	вариант В-4
$B_{\text{КС}}$, кг/с	1,790	[1,772; 1,808]	1,810	1,805	1,807 / 0,245	1,807	1,788
$G_{1\text{к}}$, кг/с	101,46	[100,44; 102,47]	100,19	100,25	100,45 / 0,645	100,46	100,45
$G_{2\text{т}}$, кг/с	99,54	[97,05; 102,03]	100,79	100,74	100,94 / 0,564	100,91	100,92
$N_{\text{ГТУ}}$, МВт	29,23	[28,94; 29,52]	29,20	29,20	29,21 / 0,775	29,18	29,19
$h_{\text{топл}}$, МДж/кг	0,11509	[0,11279; 0,11739]	0,11509	0,11509	0,11509	0,11509	0,11584
$Q_{\text{р}}^{\text{н}}$, МДж/кг	50,535	50,535**	50,535	50,535	50,535	50,535	50,535
$h_{1\text{к}}$, МДж/кг	0,002692	[0,002625; 0,002759]	0,002692	0,002692	0,002692	0,002692	0,002740
$h_{2\text{т}}$, МДж/кг	0,60243	[0,59038; 0,61448]	0,60243	0,60243	0,60243	0,60243	0,59309
$\eta_{5\text{т}}$, ед.	0,9414	0,9414***	0,9414	0,9414	0,9414	0,9414	0,9414
ΔG , кг/с****	3,7100	–	1,2047	1,3125	1,2470	1,3555	1,3101
ΔE , МВт****	–0,0786	–	–0,0241	–0,0262	–0,0250	0,0029	0,0301
$F(\lambda)$	13,7703	–	4,6201	4,6940	4,6220	4,7176	4,3191

Примечания: * серым фоном отмечены ячейки, значения в которых находятся вне установленных метрологических ограничений $[Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$; ** данные коммерческого учета, не подлежащие корректировке при регуляризации; *** результаты экспертной оценки, не подлежащие корректировке при регуляризации; **** ΔG – невязка материального баланса, кг/с; ΔE – невязка энергетического баланса, МВт.

Учет ограничений на значения всех параметров можно реализовать сразу в рамках численного решения, обеспечивая достоверность решения задачи (4) с учетом метрологических ограничений, позволяющих учесть индивидуальные метрологические характеристики средств измерения контролируемых параметров:

$$Y_i \in [Y_i^{\min}, Y_i^{\max}], \quad (9)$$

где Y_i^{\min} и Y_i^{\max} – границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью исправного средства измерения (или экспертной оценки).

Алгоритм численного решения задачи с учетом возможных значений теплотехнических параметров методом статистического программирования [9, 10] приведен на рис. 4.



Рис. 4. Алгоритм численного метода решения задачи регуляризации с учетом допустимых значений теплотехнических параметров

Согласно алгоритму, случайным образом заданное число раз m генерируются значения вектора искомых параметров $\mathbf{Y}\mathbf{Y} = [\mathbf{Y} \ \mathbf{Y}_1]$, включающего два вектора \mathbf{Y} и \mathbf{Y}_1 , которые ранее на первых двух этапах определялись аналитически согласно (4) и (8). Данный вектор формируется с учетом метрологических ограничений (9), представленных в табл. 1. Затем формируются матрица \mathbf{A} (2) и вектор \mathbf{Y} (3) и рассчитывается значение целевой функции F (1). При многократном повторении генерации вектора $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$ выбирается минимальное значение целевой функции, которое и является численным решением задачи регуляризации. Результаты численного решения задачи приведены в табл. 1 (вариант В-4).

Для наглядности в табл. 1 приведены также полученные ранее результаты регуляризации при скалярной постановке задачи [4] (вариант С) и векторной постановке задачи для случая неизменных значений теплотехнических параметров. При этом для векторной постановки задачи рассматриваются следующие варианты [5]:

– вариант В-1 – аналитическое решение при равных значениях λ^* ненулевых элементов диагональной матрицы параметров регуляризации λ ;

– вариант В-2 – решение, полученное методом итераций аналитических решений;

– вариант В-3 – численное решение методом статистического программирования.

Решение задачи по варианту В-4 иллюстрирует рис. 5, где по оси абсцисс отложены номера вариантов генерации вектора $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$, по оси ординат – соответствующие им значения целевой функции; сплошная линия, огибающая область значений снизу, соответствует изменению значения целевой функции с ростом числа сгенерированных векторов $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$. Анализ данных показывает, что с приемлемой для практических случаев точностью решение может быть найдено при числе сгенерированных вариантов 10^3 .

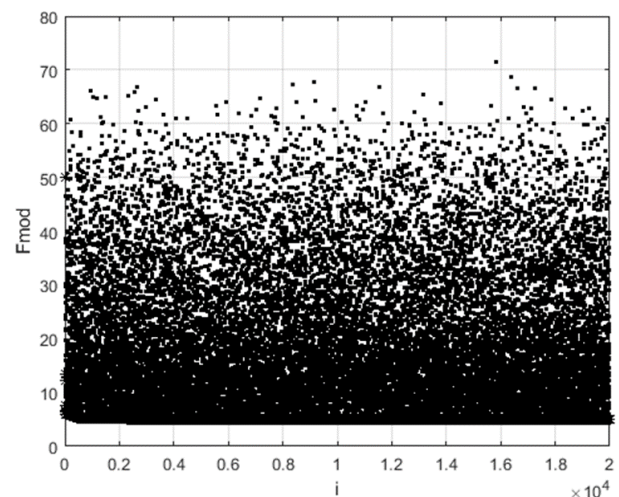


Рис. 5. Численное решение задачи регуляризации в виде зависимости значений целевой функции F от числа генераций вариантов решения i

Таким образом, учет неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей позволяет получить регуляризованные значения показателей работы оборудования при совместном сведении материального и энергетического балансов ГТУ с дополнительным уменьшением невязок балансов: значение целевой функции регуляризации (1) по сравнению с ранее предложенными вариантами решения задачи, согласно данным табл. 1, уменьшилось в среднем на 7,4%.

В завершение покажем, как предложенный вариант сведения балансов влияет на соотношение значений КПД брутто ГТУ, определяемых по прямому $\eta_{\text{бр(пр)}}^{\text{ГТУ}}$ и обратному $\eta_{\text{бр(обр)}}^{\text{ГТУ}}$ балансам [2, 3]. В табл. 2 приведены результаты расчета по варианту В-4 по сравнению с ранее полученными результатами [5] для остальных вариантов.

Таблица 2. Результаты расчетов КПД брутто ГТУ по прямому и обратному балансам для контрольного режима при различных вариантах постановки и решения задачи регуляризации

Показатель, единица измерения	Значения расчетов по разным вариантам					
	без сведения балансов [5]	вариант С [5]	вариант В-1 [5]	вариант В-2 [5]	вариант В-3 [5]	вариант В-4
$\eta_{\text{брутто}}^{\text{ГТУ}}, \%$	32,24	31,85	31,94	31,92	31,88	32,208
$\eta_{\text{брутто}}^{\text{обратный}}, \%$	32,15	32,08	31,93	31,87	31,89	32,203
Модуль отклонения, % (отн.)	0,27	0,72	0,05	0,15	0,03	0,02

Анализ данных табл. 2 показывает, что учет неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей при регуляризации позволяет практически полностью исключить невязку между значениями КПД брутто, определенными двумя способами, что является дополнительным подтверждением обоснованности предложенного способа решения задачи сведения балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности ГТУ. Это позволяет рекомендовать предложенную методику для использования в системах автоматизированного мониторинга показателей тепловой экономичности ГТУ при оперативном контроле эксплуатируемых установок, разработке нормативных энергетических характеристик оборудования, обработке результатов тепловых балансовых испытаний.

Выводы. Предложенный вариант постановки задачи сведения материальных и энергетических балансов ГТУ и ее решение в два этапа не показал значимого повышения точности результатов.

Предложенный на третьем этапе исследования вариант численного решения задачи оптимизации методом статистического программирования позволил учесть все метрологические ограничения и показал возможность дополнительного уменьшения невязок при сведении балансов массы и энергии по ГТУ.

Указанный вариант постановки и решения задачи обеспечил достижение практически полного соответствия значений КПД брутто ГТУ, определяемых по прямому и обратному балансам. Это позволяет рекомендовать предложенную методику для использования в системах автоматизированного мониторинга показателей тепловой экономичности ГТУ как при разработке нормативных энергетических характеристик оборудования, в том числе при обработке результатов тепловых балансовых испытаний, так и при оперативном контроле эксплуатируемых установок.

Список литературы

1. **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.

2. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.

3. **Горшков А.С.** Техничко-экономические показатели тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

4. **Методика** совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / А.С. Зиновьева, С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 1. – С. 5–10. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.005-010.

5. **Векторная** постановка задачи совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / А.С. Зиновьева, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.005-011.

6. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.

7. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems // Technometrics. – 1970. – No. 12. – P. 55–67.

8. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications // Amer. J. Math. Management Sci. – 1981. – No. 1. – P. 5–83.

9. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

10. **Таха Х.** Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

11. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584 с.

12. **Шелыгин Б.Л., Мошкарин А.В.** Котлы-утилизаторы парогазовых установок электростанций. – Иваново, 2012. – 284 с.

References

1. Leducovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P., Razinkov, A.A. *Teploenergetika*, 2015, no. 8, pp. 72–80. DOI: 10.1134/S0040363615080032.

2. Leducovskiy, 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.

3. Gorshkov, A.S. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsiy* [Technical and economic indicators of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 240 p.

4. Zinov'eva, A.S., Gorshenin, S.D., Leducovskiy, G.V., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2023,

issue 1, pp. 5–10. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.005-010.

5. Zinov'eva, A.S., Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Shuvalov, S.I. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.005-011.

6. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979. 285 p.

7. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems. *Technometrics*, 1970, no. 12, pp. 55–67.

8. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications. *Amer. J. Math. Management Sci.*, 1981, no. 1, pp. 5–83.

9. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research:

challenges, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.

10. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.

11. Tsanev, S.V., Burov, V.D., Remezov, A.N. *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas turbine and combined cycle plants of thermal power plants]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2002. 584 p.

12. Shelygin, B.L., Moshkarin, A.V. *Kotly-utilizatory parogazovykh ustanovok elektrostantsiy* [Waste heat boilers of steam-gas plants of power plants]. Ivanovo, 2012. 284 p.

УДК 628.474.3 : 004.94

Ашраф Абдулла Ахмед

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, аспирант кафедры энергетики теплотехнологии, Россия, Белгород, телефон (4722) 500-381, e-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq

Павел Алексеевич Трубаев

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологии, Россия, Белгород, телефон (4722) 500-381, e-mail: trubaev@mail.ru

Исследование режимов горения RDF-топлива в котле малой мощности при изменении влажности топлива и коэффициента избытка воздуха¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Адекватность результатов CFD-моделирования в значительной степени зависит от принятого подхода к моделированию и точности заданных граничных условий. Моделирование горения твердого топлива характеризуется большой сложностью и в связи с высокими вычислительными и временными затратами невозможно без использования существенных упрощений. В связи с этим актуальным является разработка CFD-модели горения твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности, позволяющей получать решения с приемлемыми вычислительными и временными затратами.

Материалы и методы. Предложен подход к построению CFD-модели горения твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности. Предлагается слой топлива в отдельную расчетную область не выделять и заменить его граничными условиями, расчетная область при этом должна содержать только газовую часть. Для моделирования горения применяется механизм, состоящий из газофазных реакций окисления СО и углеводородов выделившихся летучих веществ и гетерогенной реакции горения твердого углерода на поверхности слоя топлива. Для оценки параметров модели использованы результаты испытаний промышленного котла, сжигающего RDF-топливо (refuse-derived fuel – топливо, полученное из отходов), что позволило обеспечить допустимое совпадение результатов моделирования с данными измерений на котле при разных режимах его работы.

Результаты. Для окисления находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ предлагается производить дожиг вредных веществ в дополнительном газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью (газоводяным теплообменником). В результате моделирования процесса горения при изменении влажности с 10 до 50 % и коэффициента избытка воздуха α с 1,4 до 2,2 установлено, что при незначительном повышении параметров (влажности до 30 % и α до 1,6) условия дожига вредных веществ (нахождение продуктов сгорания более 2 с при температурах 850/1100 °С) соблюдается, но при дальнейшем увеличении параметров дожиг не обеспечивается, при увеличении влажности до 50 % из-за низкой температуры горения даже при увеличении времени нахождения газов в расчетном объеме горение заканчивается позднее, при увеличении коэффициента избытка воздуха наряду с уменьшением температуры газов увеличивается их объем и скорость, что приводит к уменьшению времени нахождения газов в расчетном объеме.

Выводы. Разработанная CFD-модель обеспечивает допустимое совпадение с результатами измерений на промышленном котле при разных режимах его работы, что позволяет считать ее адекватной. Для обеспечения полного сгорания топлива и последующего нахождения продуктов горения не менее 2 с при температурах более 850/1100 °С необходимо соблюдать режим горения при оптимальном коэффициенте избытка воздуха (1,4–1,6) без превышения этого значения, при этом недопустимо подавать на сжигание материал с высокой влажностью.

Ключевые слова: CFD-модель, RDF-топливо, процесс горения, колосниковая решетка, дожиг вредных веществ

Ashraf Abdulla Ahmed

BSTU named after V.G. Shukhov, Postgraduate Student of Heat Engineering Technology Department, Russia, Belgorod, telephone (4722) 500-381, e-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq

Pavel Alekseevich Trubaev

BSTU named after V.G. Shukhov, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Heat Engineering Technology Department, Russia, Belgorod, telephone (4722) 500-381, e-mail: trubaev@mail.ru

¹ Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

The study is carried out within the framework of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of the BSTU named after V.G. Shukhov

Study of RDF combustion modes in a small capacity boiler when changing fuel moisture content and excess air ratio

Abstract

Background. The adequacy of CFD modelling results depends to a large extent on the modelling approach adopted and the accuracy of the specified boundary conditions. Modelling of solid fuel combustion is very complicated and, due to high computational and time costs, is impossible without significant simplifications. Thus, it is relevant to develop a CFD model of solid fuel combustion in a fixed bed in furnaces and low-power boilers. The model allows obtaining simulation results with acceptable computational and time costs.

Materials and methods. The authors have proposed an approach to design a CFD model of solid fuel combustion in a fixed bed in furnaces and low-power boilers. It is proposed not to allocate the fuel bed into a separate computational domain and replace it with boundary conditions; in this case, the computational domain should contain only the gas part. For combustion modelling, the authors have applied the mechanism that consists of gas-phase reactions of CO and hydrocarbon oxidation of the released volatiles, and a heterogeneous interaction of solid carbon combustion on the surface of the fuel bed. To estimate the model parameters, the results of tests of an industrial boiler burning RDF have been used. It made it possible to ensure acceptable agreement of the modelling results and the data of measurements on the boiler under different modes of operation.

Results. To oxidize the organic harmful substances in the combustion products of the waste, it is suggested to carry out afterburning of deleterious substances in an additional gas duct located between the furnace and the convective part (gas-water heat exchanger). As a result of modelling the combustion process when changing humidity from 10 to 50 % and excess air coefficient from 1,4 to 2,2, it is established that with an insignificant increase of parameters (humidity up to 30 % and α up to 1,6), conditions of afterburning of harmful substances (presence of combustion products for more than 2 sec at temperatures of 850/1100 °C) are observed. But with further increase of parameters afterburning is not ensured. When the humidity increases up to 50 percent due to low combustion temperature, even when the time of gases in the calculated volume increases, the combustion ends later. With an increase of excess air ratio along with a decrease of temperature of gases, their volume and velocity increase, which leads to a reduction of time of presence of gases in the calculated volume.

Conclusions. The developed CFD model provides an acceptable agreement with the results of measurements on the industrial boiler under different modes of operation, which allows us to consider it adequate. To ensure complete combustion of fuel and subsequent presence of combustion products at temperatures above 850/1100 °C for more than 2 s, it is necessary to observe the combustion mode at the optimum excess air ratio (1,4–1,6) without exceeding this value. At the same time, it is unacceptable to supply material with high humidity for combustion.

Key words: CFD-model, RDF, combustion, grate, afterburning of harmful substances

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.013-021

Введение. Сжигание биомассы и отходов в неподвижном или перемешиваемом слое на колосниковой решетке является одной из основных технологий производства теплоты и энергии в печах и котлах малой мощности, поскольку позволяет эффективно сжигать разнообразные виды топлива с различным уровнем влажности и требует минимальной подготовки топлива [1], но на эффективность сжигания существенно влияют условия эксплуатации и горения [2]. Проблема использования альтернативных топлив обусловлена, как правило, их низкой калорийностью [3]. Эффективно управлять процессом горения возможно с использованием CFD-моделирования, обеспечивая в котле оптимальный режим, определенный в результате исследования модели [4].

Для моделирования работы маломасштабных котлов с фиксированным слоем топлива необходим учет взаимодействующих процессов горения, движения среды и тепло-массообмена, сложность которых влияет на время вычислений и точность результатов моделирования [2].

При моделировании горения неподвижного слоя твердого топлива в CFD-системах используют три основных подхода [2]:

1) слой топлива в модель не включается, и в качестве граничных условий задаются экспериментальные данные скорости горения и выхода летучих веществ;

2) горение представляется как две отдельные модели – первая включает тепло-, массообмен и химические реакции в твердой фазе с получением газообразных продуктов горения, параметры которых представляют граничные условия для второй модели, содержащей газовую область;

3) слой топлива представляется в виде пористой зоны, через которую проходит воздух; процессы сушки, газификации и выхода летучих задаются в виде пользовательских функций (UDF).

Адекватность результатов CFD-моделирования в значительной степени зависит от принятого подхода к моделированию и точности заданных граничных условий. Во многих случаях достоверные результаты возможно получить при использовании упрощенных граничных условий в сочетании с уменьшенной расчетной сеткой [4]. На теплопередачу в печи определяющее влияние оказывает теплота сгорания топлива, от которой зависит температура горения. Вид топлива и его свойства при этом

на теплопередачу в печи не оказывают заметного влияния [5]. На эффективность горения и образование выбросов значительное влияние оказывают условия подачи воздуха для горения [4, 6] и влажность топлива, которая существенно влияет на снижение теплотворной способности и температуры воспламенения, а также на скорость горения [7]. Повышенное содержание влаги в топливе приводит к неполному сгоранию, увеличению количества смол [8].

Цель исследования – представить подход к использованию компьютерного моделирования процесса сжигания твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности в программном комплексе Ansys Fluent, позволяющий получать решения с приемлемыми вычислительными и временными затратами.

В настоящее время принято сжигать отходы крупных городов в котлах мощностью от 60 до 300 МВт. Ниже предлагается альтернативный подход – сжигание твердых коммунальных отходов (ТКО) и RDF-топлива (refuse-derived fuel – топливо, полученное из отходов) в установках малой мощности в пределах полигонов ТКО для обеспечения местного энергоснабжения. В отличие от крупных мусоросжигательных установок, при небольшой производительности возможно осуществить качественную сортировку с отбором фракций, содержащих тяжелые металлы, что исключает их переход в продукты сгорания. Кроме того, расположение источника выбросов в пределах полигона ТКО, уже являющегося территорией с неблагоприятной экологической обстановкой с выделенной санитарно-защитной зоной, позволит избежать экологических проблем крупных установок.

Методы исследования. Описание CFD-модели. Так как моделирование горения характеризуется большой сложностью, в целях упрощения слой топлива предлагается в отдельную расчетную область не выделять и заменить его граничными условиями, расчетная область при этом будет содержать только газовую часть. В связи с крайней неоднородностью состава отходов детальные механизмы окисления для них отсутствуют. Поэтому для моделирования горения применяется механизм, состоящий из газофазных реакций окисления СО и углеводородов выделившихся летучих веществ и гетерогенной реакции горения твердого углерода на поверхности слоя топлива.

В модели не учитывается унос твердых частиц с поверхности слоя. Для котла мощностью 1 МВт с размером решетки 2×1,22 мм усредненная скорость потока газов по горизонтальному сечению для топлив различного вида (угля, отходов, древесины) будет составлять:

- воздуха – 0,13–0,15 м/с (при н.у.);
- продуктов горения – 0,15–0,21 м/с (при н.у.) и 1,1–1,2 м/с при температуре горения.

В [9] проведен анализ скорости витания горных материалов неправильной формы и установлено, что наиболее подходящим выражением для определения скорости витания является формула А.Е. Смолдырева, определен коэффициент сопротивления частиц ψ , который для пород, близких по характеристикам к твердому топливу, составил 0,72–1,2.

Диаметр частиц, при котором начинается унос при таких скоростях, составляет 45 мкм.

Несгоревшие частицы такого размера, находясь в потоке горячего газа, будут прогреваться и сгорать за время менее 0,1 с [10], поэтому выдвигаемое упрощение об отсутствии уноса не приведет к погрешности моделирования.

Таким образом, исходя из отсутствия уноса частиц, горение коксового остатка осуществляется в слое топлива и место окончания горения в топке определяется сгоранием летучих веществ.

При разработке моделей сделаны следующие предположения:

- слой топлива моделируется через его непрерывную подачу на границе области, ограничивающей твердое топливо;
- уравнение импульса твердой фазы не учитывается;
- тепловое равновесие между фазами отсутствует;
- для характеристики процесса сушки используется модель постоянной температуры;
- включено горение в газовой фазе;
- для описания пиролиза используется модель параллельной реакции с одним этапом;
- включены газификация и сжигание, которые являются гетерогенными реакциями углеродного остатка;
- скорость однородного горения рассчитывается по модели вихревой диссипации (EDM);
- транспортировка газов в твердой фазе не учитывается; продукты горения выделяются немедленно с той же температурой, которую имеет твердая фаза.

Границы трехмерной расчетной области были представлены следующими областями (рис. 1):

1. Air inlet – входное окно для воздуха. В качестве граничных условий задавался состав воздуха (0,23 массовых долей кислорода и 0,77 азота), массовый расход, температура.
2. Outlet – выходное окно для продуктов горения.
3. Fuel – область, ограничивающая твердое топливо, для которой задавались массовый расход топлива, температура и в окне Coal calculator состав топлива.
4. Wall Surface – стенки топki/котла, для которых задавались материал и толщина стенки, а также граничные условия третьего рода, в которых заданы коэффициент внешней конвек-

тивной теплоотдачи, непрозрачность для излучения, степень черноты поверхности $\varepsilon = 0,9$.

5. Symmetric – сечение, делящее объект на две симметричные части для упрощения расчетов.

В разработанную расчетную модель, кроме включенных по умолчанию уравнений законов сохранения массы и импульса, включены модели физических процессов, представленные в табл. 1.

Топливо поступает в расчетную область, соответствующую газовой части, через поверхность Fuel (рис. 2), горение происходит на границе области при окислении топлива кислородом воздуха, проходящего между участками поверхности топлива.

Форма расчетной области топлива выбрана прямоугольной, так как круглая форма из-за особенностей построения сетки не обеспечивает сходимость решения.

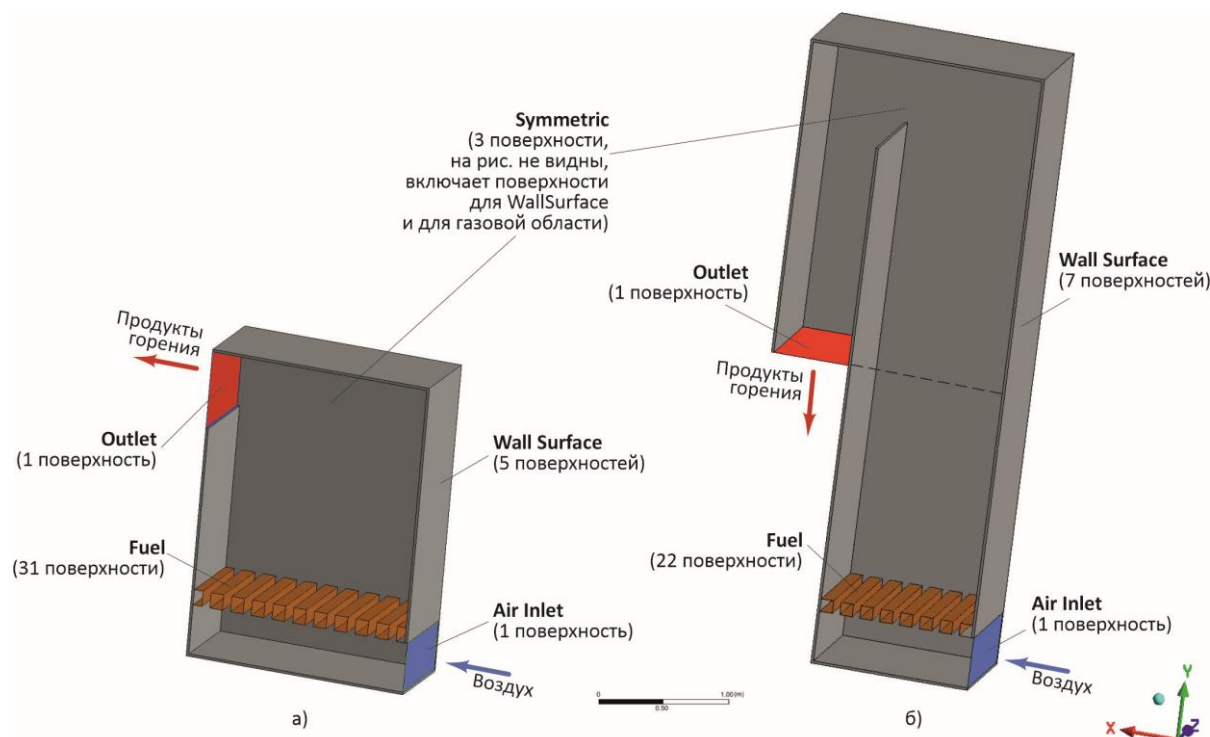


Рис. 1. Граничные условия расчетной модели при моделировании топки: а – модель топки; б – модель топки с дополнительным газоходом для дожига вредных соединений

Таблица 1. Параметры расчетных моделей

Модели физических процессов	Параметр	Значение
1. Модели теплообмена конвекцией и теплопроводностью (Energy)	–	–
2. Модель турбулентности (Viscous)	Model	k-ε (модель турбулентности)
	k-ε модель	Realizable
	Near-War Treatment	Standard Wall Function
3. Модель теплообмена излучением (Radiation)	Discrete Ordinates	Solar Load (off)
4. Модель переноса компонентов (Species Transport)	Reactions	Volumetric
	Chemistry Solver	None-Direct Source
	Mixture Material	Coal-volatiles-air
	Turbulence-Chemistry Interaction	EDD-Dissipation
5. Модель образования оксидов азота (NOx)	Pathways	Thermal NOx Prompt NOx Fuel NOx
	Fuel Streams	Vol
6. Модель дискретной фазы (Discrete Phase)	–	–

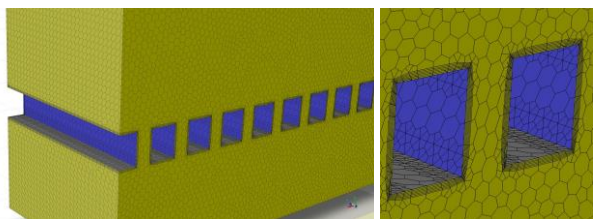


Рис. 2. Расчетная область с граничными условиями для поступления топлива

Определение параметров объекта в ходе промышленных испытаний. Для получения характеристик процесса сжигания, необходимых в процессе разработки и тестирования модели в целях обеспечения ее адекватности, использовались параметры работы промышленного котла KBM-1,0 мощностью 1 МВт (рис. 3), эксплуатируемого на полигоне ТКО «Стрелецкий» (г. Белгород, ул. Зареченская, 85). Котел используется для отопления административного здания и двух производственных цехов, система отопления выполнена по закрытой зависимой схеме. Топливом в котельной является древесина.

Для проведения испытаний была изготовлена партия RDF-топлива из частично высушенных отходов ТКО, вывозимых на полигон. Характеристики топлива приняты расчетные по среднему составу отходов полигона ТКО, полученные путем отбора проб, разделения их на фракции и взвешивания. По морфологическому составу отходов был рассчитан элементарный состав (табл. 2).

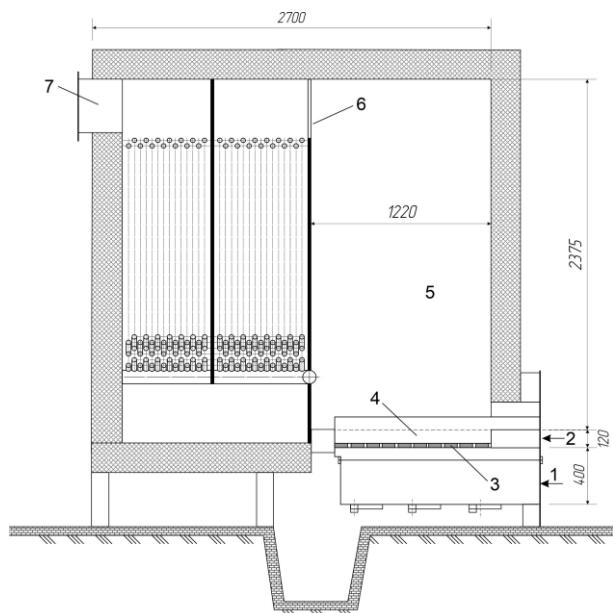


Рис. 3. Твердотопливный котел KBM-1,0: 1 — подача воздуха; 2 — подача топлива; 3 — колосниковая решетка; 4 — слой топлива; 5 — топка; 6 — окно между топкой и теплообменником (место замеров); 7 — выход продуктов горения в дымовую трубу

Подготовка топлива велась на линии производства древесных пеллет в виде цилиндрических брикетов диаметром 50 мм, длиной 250–400 мм. Сжигание проводилось в течение 4 дней (с 04.12.23 г. по 07.12.23 г.) для разных значений избытка воздуха, который задавался частотой вращения дутьевого вентилятора.

Таблица 2. Состав сжигаемых отходов

Морфологический состав отходов		Элементарный состав	
Фракция	массовые %	элемент	массовые %
Бумага	21,48	C ^p	34,20
Пищевые отходы	36,80	H ^p	4,61
Текстиль	3,20	O ^p	21,90
Древесина	6,82	N ^p	0,91
Пластмасса	16,60	S ^p	0,25
Отсев	4,02	A ^p	28,20
Негорючая масса	11,08	W ^p	10,00
Всего	100	Всего	100

Выполнялись следующие замеры.

1. Измерение температуры и состава уходящих газов (O₂, CO) после котла с использованием газоанализатора Testo 330-1 LL для контроля недожога, расчета коэффициента избытка воздуха и оценки стабильности режима (интервал 1–3 мин);

2. Измерение скорости воздуха и отходящих газов для определения объемного расхода с использованием дифференциального манометра Testo 512/2 и трубки Пито Testo 1000 мм (интервал 5–10 мин при достижении стационарного режима);

3. Измерение содержания выбросов (SO₂, NO_x, H₂S) с использованием газоанализатора MPU Vario Plus (интервал 5 мин при достижении стационарного режима);

4. Измерение температуры (пирометр Testo-845) и расхода (ультразвуковой расходомер Panametrics PT878) нагреваемой воды для определения теплопроизводительности котла и, как результат, КПД котла – расхода топлива.

КПД котельного агрегата определялся методом обратного баланса.

Также в ходе проведения испытаний аккредитованной лабораторией Росприроднадзора проводились измерения выбросов загрязняющих веществ, которые показали содержание выбросов в пределах ПДК для воздуха рабочих зон.

Проверка адекватности модели.

Адекватность моделирования горения на этапе разработки модели проверялась аналитическими методами:

1) путем сравнения:

– усредненного состава газов в выходном окне (outlet) и состава продуктов горения из расчета горения топлива;

– усредненной температуры газового потока в выходном окне (outlet) и результатов расчета адиабатной температуры горения;

– усредненного содержания SO_2 и NO_x в выходном окне (outlet) и результатов расчета выбросов при сжигании твердого топлива и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке отходов;

2) анализом распределения температур, содержания O_2 , CO , летучих по длине линий тока (обозначаемых в Ansys Fluent как Streamline).

Для оценки адекватности модели и решения задачи по организации дожига вредных веществ после топки была разработана методика определения времени нахождения продуктов горения в расчетной области после окончания процессов горения, основанная на анализе импортированных из решения данных линий тока (streamline). Для каждой линии тока (их общее количество в разных решениях изменялось от 200 до 400) по координатам точек определялось расстояние между ними, по скорости – время прохождения. Время окончания горения определялось по снижению содержания летучих и CO ниже заданного предела. Программа, разработанная на языке программирования VBA для Excel, производит расчет среднего и минимального времени нахождения газов в расчетной области после окончания горения, расчет средних значений переменных в выходном сечении, графическую визуализацию выбранных линий тока.

Для предлагаемой модели путем оценки ее параметров по результатам данных испытаний определены: а) форма и размеры области Fuel, ограничивающей твердое топливо; б) тип и размер сетки для расчетной (газовой) области и ограничивающих поверхностей; в) параметры моделей физических процессов (см. табл. 1).

Сопоставление средних значений измерений с результатами моделирования приведены в табл. 3.

В результате параметры модели обеспечили допустимое совпадение с результатами измерений на промышленном котле при разных режимах его работы, что позволяет считать разработанную модель адекватной.

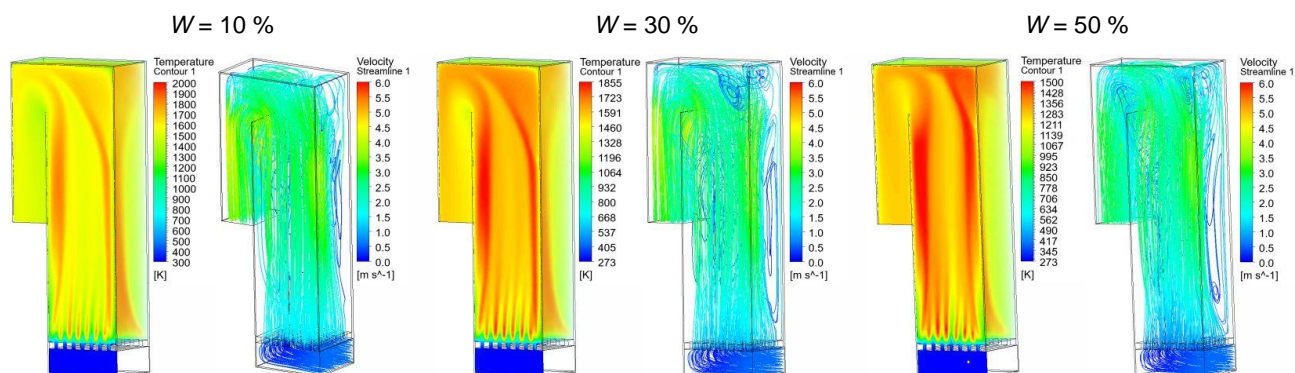
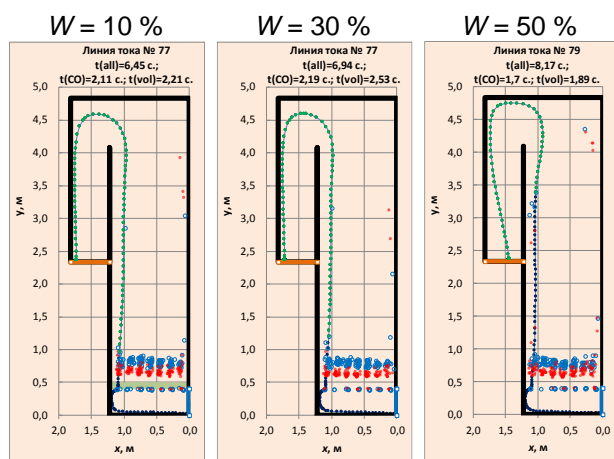
Результаты моделирования процесса дожига вредных веществ. Для практически полного окисления находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ необходимо обеспечить высокие температуры. Согласно Директиве Европейского Парламента и Совета 2010/75/ЕС от 24.11.2010 г. о промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним), экологическим требованиям удовлетворяют установки, в которых продукты горения находятся не менее 2 с при температуре не менее 850°C . Если сжигаются опасные отходы с содержанием галогенных органических соединений более 1 % (при пересчете на хлорин), температура должна быть минимум 1100°C .

Предлагается производить дожиг вредных веществ в дополнительном газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью (газоводяным теплообменником).

Изменение влажности топлива. В результате моделирования установлено, что оптимальный диапазон влагосодержания топлива для устойчивого распространения и стабильности пламени составляет 10 % [11]. В [12] установлено, что в диапазоне влажности 8–30 % максимальная температура в слое и над ним, а также условия горения и образование вредных веществ существенно не изменяются. Для выявления особенностей изменения режима горения и влияния варьирования влажности топлива на характер горения было проведено моделирование процесса горения при увеличении его влажности до 30 и 50 % (рис. 4, 5).

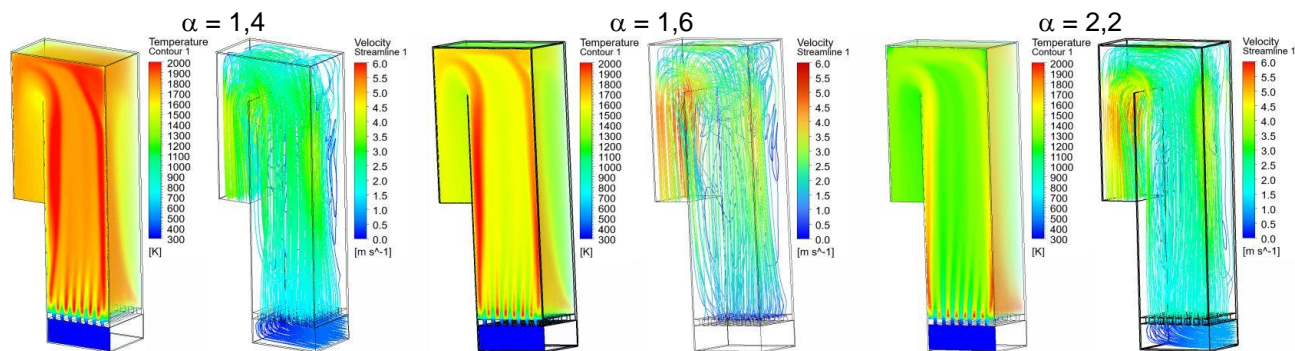
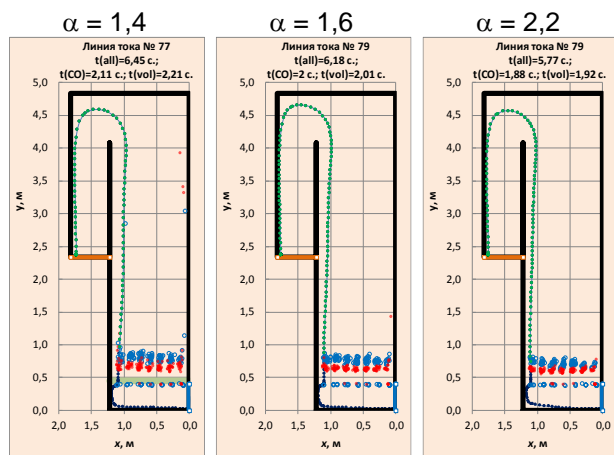
Таблица 3. Параметры газового потока на выходе из топки

Параметр	Коэффициент избытка воздуха α					
	1,4		1,6		2,0	
	данные измерений	результаты моделирования	данные измерений	результаты моделирования	данные измерений	результаты моделирования
Температура, $^\circ\text{C}$	1392	1457	1212	1267	1010	994
O_2 , об. %	6,0	5,2	7,9	8,4	10,5	11,8
NO_x , ppm	42,7	57,4	167	132,8	149	151,2
SO_2 , ppm	172	225,3	141	111,4	96	78,6
CO , ppm	736	540	605	505	–	45
H_2S , ppm	1,3	1,25	1,3	0,99	1,1	0,87

Рис. 4. Результаты моделирования процесса горения топлива с разной влажностью W ($\alpha = 1,4$)Рис. 5. Результаты расчета времени прохождения потока в расчетной области для топлива с разной влажностью W (при $\alpha = 1,35$)

Анализ полученных результатов показывает, что поля скоростей для трех вариантов похожи, но при увеличении влажности снижается температура газов и, соответственно, их скорость.

Изменение коэффициента избытка воздуха. В [11] установлено, что оптимальный коэффициент избытка воздуха при сжигании отходов в неподвижном слое равен 1,4, что подтверждает и ряд других исследований [13]. Но так как при работе печей из-за нестабильности состава отходов возможно изменение условий горения, предпочтительнее избыток воздуха поддерживать с запасом. Для определения возможной величины избытка воздуха проведено моделирование процесса горения топлива при трех значениях расхода воздуха (рис. 6, 7).

Рис. 6. Результаты моделирования процесса горения топлива с разным избытком воздуха (при $W = 10\%$)Рис. 7. Результаты расчета времени прохождения потока в расчетной области с разным избытком воздуха α (при $W = 10\%$)

При увеличении коэффициента избытка воздуха температура газов снижается.

Основные результаты. В табл. 4 приведено сравнение результатов расчета для каждого диапазона влажности и избытка воздуха. Результаты моделирования показывают, что расчетные параметры температуры продуктов горения на выходе из расчетной зоны ниже расчетной температуры горения значений на

величину около 200 °С, что связано с потерями теплоты в окружающую среду через стенки топки (что составляет 10 % от поступившей теплоты и согласуется со справочными данными для малых котлов).

При увеличении влажности до 30 % и коэффициента избытка воздуха до 1,6 время прохождения продуктов горения после окончания горения составляет 2 секунды и более (табл. 5).

Таблица 4. Основные результаты расчета

Коэффициент избытка воздуха	Влажность топлива, %	Температура, °С		
		максимальная в топке	средняя в выходном окне	расчетная (по балансу горения топлива)
1,4	10	1798	1445	1668
	30	1562	1242	1491
	50	1258	969	1206
1,4	10	1798	1445	1668
1,6		1796	1244	1483
2,2		1745	986	1190

Таблица 5. Сравнение вариантов расчета

Коэффициент избытка воздуха	Влажность, %	Время прохождения потока t , с					
		общее (от входного сечения до выходного)		время прохождения после окончания горения			
				оценка по $CO \leq CO_{min}$		оценка по содержанию летучих веществ $Vol \leq Vol_{min}$	
		t_{cp}	t_{min}	t_{cp}	t_{min}	t_{cp}	t_{min}
1,4	10	5,76	3,79	3,06	2,11	3,13	2,11
	30	5,85	4,01	3,48	2,19	3,60	2,10
	50	7,17	4,15	4,83	1,70	4,86	1,89
1,4	10	5,76	3,79	3,06	2,11	3,13	2,11
1,6		5,20	3,28	2,94	2,00	3,09	2,01
2,2		4,22	2,82	2,84	1,88	2,85	1,92

Но при дальнейшем увеличении параметров данное условие не соблюдается. При увеличении влажности до 50 % из-за низкой температуры горения даже при увеличении времени нахождения газов в расчетном объеме горение заканчивается позднее.

При увеличении коэффициента избытка воздуха наряду с уменьшением температуры газов увеличивается их объем и скорость, что приводит к уменьшению времени нахождения газов в расчетном объеме.

Таким образом, чтобы обеспечить полное сгорание топлива и последующее нахождение продуктов горения при температурах более 850 °С более 2 с, необходимо соблюдать режим горения при оптимальном коэффициенте избытка воздуха (1,4–1,6) без превышения этого значения. При этом недопустимо подавать на сжигание материал влажностью более 30 %.

Выводы. Полученные результаты обеспечивают достижение цели исследования – разработка CFD-модели, предназначенной для моделирования горения в топках и печах малой

мощности с колосниковой решеткой. С использованием полученной модели произведен анализ процесса дожига вредных веществ в дополнительном газоходе.

Научная новизна исследования заключается в новом подходе к моделированию горения в слое, позволяющему получать результаты с требуемой точностью и приемлемыми временными затратами. Практическая значимость полученных результатов заключается в установлении пределов влажности и коэффициента избытка воздуха при сжигании ТКО, обеспечивающих дожиг вредных веществ в дополнительном газоходе.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании установок для сжигания твердого топлива и отходов в целях поиска конструктивных решений для минимизации выбросов вредных веществ. Направления дальнейших исследований связаны с моделированием движения газов в конвективном трубном пучке, поиском методов

снижения выбросов путем организации рецикуляции продуктов сгорания.

Список литературы

1. **Review** on modelling approaches based on computational fluid dynamics for biomass combustion systems / A. Dembecher, D.A. Alonso, A. Ortwein, F. Tabet // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2019. – Vol. 9(1). – P. 129–182. DOI: 10.1007/s13399-019-00370-z.
2. **Chaney J., Liu H., Li J.** An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – Vol. 63. – P. 149–156. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.036.
3. **Сжигание** рдф-топлива с использованием кислородного дутья / В.М. Коновалов, А.А. Гончаров, А.С. Федоров и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 10. – С. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86.
4. **The impact** of secondary air boundary conditions on CFD results in small-scale wood pellet combustion / T. Zdravcevic, B. Rajh, F. Kokalj, N. Samec // *Fuel*. – 2022. – Vol. 324(113919). – P. 124451. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124451.
5. **Judt W.** Numerical and Experimental Analysis of Heat Transfer for Solid Fuels Combustion in Fixed Bed Conditions // *Energies*. – 2020. – Vol. 13(22). – P. 6141. DOI: 10.3390/en13226141.
6. **Junejo A., Al-Abdeli Y.M., Porteiro J.** Role of Air Staging in a Batch-Type Fixed Bed Biomass Combustor under Constant Primary Air // *Journal of Thermal Science*. – 2023. – Vol. 33(1). – P. 284–299. DOI: 10.1007/s11630-023-1869-9.
7. **Performance** and boiler efficiency using low-grade coal on 400 MWe coal-fired power plant: case study of Suralaya Power Plant Unit 2 / E. Supriyanto, N. Cahyo, R. Sitanggang, et al. // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2021. – Vol. 882. – P. 12033. DOI: 10.1088/1755-1315/882/1/012033.
8. **Combustion** and mass loss behavior and characteristics of a single biomass pellet positioning at different orientations in a fixed bed reactor / S.A. El-Sayed, M.E. Mostafa, T.M. Khass, et al. // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2024. – Vol. 14. – P. 15373–15393. DOI: 10.1007/s13399-023-03767-z.
9. **Часе С.И.** Определение скорости витания мелкозернистых материалов методом взвешенного состояния // *Известия УГТУ*. – 1997. – № 6. – С. 157–164.
10. **Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Цимбал В.Д.** Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. – СПб.: СПбГУПТД, 2020. – Ч. 3. – 154 с.
11. **Ahmed A.A., Trubaev P.A., Ramazanov R.S.** CFD Modelling and Optimization of Solid Waste Combustion in a 1 MW Fixed Bed Combustion Chamber // *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*. – 2024. – Vol. 23(1). – P. 66–87. DOI: 10.37934/arnht.23.1.6687.

12. **Modelling** fuel flexibility in fixed-bed biomass conversion with a low primary air ratio in an updraft configuration / A. Anca-Couce, G. Archan, M. Buchmayr, et al. // *Fuel*. – 2021. – Vol. 296. – P. 120687. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120687

13. **CFD Steady Model** Applied to a Biomass Boiler Operating in Air Enrichment Conditions / M.Á. Gómez, R. Martín, J. Collazo, J. Porteiro // *Energies*. – 2018. – Vol. 11(10). – P. 2513. DOI: 10.3390/en11102513.

References

1. Dembecher, A., Alonso, D.A., Ortwein, A., Tabet, F. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2019, vol. 9(1), pp. 129–182. DOI: 10.1007/s13399-019-00370-z.
2. Chaney, J., Liu, H., Li, J. *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 63, pp. 149–156. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.036.
3. Konovalov, V.M., Goncharov, A.A., Fedorov, A.S., Moshkov, I.P., Gostev, N.S. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2022, no. 10, pp. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86.
4. Zdravcevic, T., Rajh, B., Kokalj, F., Samec, N. *Fuel*, 2022, vol. 324(113919), p. 124451. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124451.
5. Judt, W. *Energies*, 2020, vol. 13(22), p. 6141. DOI: 10.3390/en13226141.
6. Junejo, A., Al-Abdeli, Y.M., Porteiro, J. *Journal of Thermal Science*, 2023, vol. 33(1), pp. 284–299. DOI: 10.1007/s11630-023-1869-9.
7. Supriyanto, E., Cahyo, N., Sitanggang, R., Triani, M., Bakti, D. Performance and boiler efficiency using low-grade coal on 400 MWe coal-fired power plant: case study of Suralaya Power Plant Unit 2. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 882, p. 12033. DOI: 10.1088/1755-1315/882/1/012033.
8. El-Sayed, S.A., Mostafa, M.E., Khass, T.M., Noseir, E.H., Ismail, M.A. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 14, pp. 15373–15393. DOI: 10.1007/s13399-023-03767-z.
9. Chase, S.I. *Izvestiya UGGU*, 1997, no. 6, pp. 157–164.
10. Belousov, V.N., Smorodin, S.N., Tsimbal, V.D. *Toplivo i protsessy goreniya v teploenergeticheskikh ustanovkakh. Ch. 3* [Fuel and combustion processes in thermal power plants. Part 3]. Saint-Petersburg: SPbGUPTD, 2020. 154 p.
11. Ahmed, A.A., Trubaev, P.A., Ramazanov R.S. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*, 2024, vol. 23(1), pp. 66–87. DOI: 10.37934/arnht.23.1.6687.
12. Anca-Couce, A., Archan, G., Buchmayr, M., Essl, M., Hochenauer, C., Scharler, R. *Fuel*, 2021, vol. 296, p. 120687. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120687
13. Gómez, M.Á., Martín, R., Collazo, J., Porteiro, J. *Energies*, 2018, vol. 11(10), p. 2513. DOI: 10.3390/en11102513.

УДК 620.9

Андрей Валентинович Нуждин

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, телефон (8635) 25-52-27, e-mail: nuzhdin_av@npi-tu.ru

Наталья Юрьевна Курнакова

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, телефон (8635) 25-52-27, e-mail: kurnatalya82@mail.ru

Илья Владимирович Янченко

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, телефон (8635) 25-52-27, e-mail: vozhdvolgi@rambler.ru

Повышение энергетической эффективности ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76 за счет комплексного использования вторичных энергоресурсов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Россия обладает крупнейшими запасами природного газа в мире. Для доставки природного газа от места добычи к потребителям в нашей стране традиционно используются магистральные газопроводы. Сооружение, обслуживание и эксплуатация магистральных газопроводов требует значительных средств, поэтому уменьшение затрат на перекачивание природного газа за счет повышения энергетической эффективности газотурбинных установок при комплексном использовании вторичных энергоресурсов представляет значительный интерес.

Материалы и методы. Проведенные исследования выполнены с использованием известных методик термодинамического расчета цикла двигателя внутреннего сгорания, определения составляющих его теплового баланса и теплового расчета оборудования для утилизации вторичных тепловых энергетических ресурсов.

Результаты. После комплексного использования вторичных энергоресурсов проведен анализ расходной части энергетического баланса газотурбинной установки, который показал, что для привода газового компрессора используется 16000 кВт (41,7 %) тепловой энергии приходящей части энергетического баланса, для привода компрессоров низкого и высокого давления – 9899 кВт (25,8 %), с продуктами сгорания отводится 11311 кВт (29,4 %), а потери в окружающую среду составляют 1152 кВт (3 %).

Выводы. По сравнению с базовой ГТУ потери теплоты с продуктами сгорания уменьшились на 65 %. Проведенные энергосберегающие мероприятия по использованию вторичных энергоресурсов позволили уменьшить расход природного газа при работе ГТУ на номинальном режиме по сравнению с базовой ГТУ на 23 %. С учетом выработки электрической энергии за счет использования энергии избыточного давления топочного газа и тепла при нагреве сетевой воды системы теплоснабжения газоперекачивающей станции полезно использовано 35420 кВт или 92,2 % подведенной энергии.

Ключевые слова: газотурбинная установка, вторичные энергоресурсы, энергетическая эффективность, потери теплоты, расход природного газа

Andrey Valentinovich Nuzhdin

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants and Heat Engineering Department, Russia, Novocherkassk, telephone (8635) 25-52-27, e-mail: nuzhdin_av@npi-tu.ru

Natalya Yurievna Kurnakova

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants and Heat Engineering Department, Russia, Novocherkassk, telephone (8635) 25-52-27, e-mail: kurnatalya82@mail.ru

Ilya Vladimirovich Yanchenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants and Heat Engineering Department, Russia, Novocherkassk, telephone (8635) 25-52-27, e-mail: vozhdvolgi@rambler.ru

Increasing energy efficiency of gas turbine unit of GPA-Ts-16/76 gas pumping unit due to integrated use of secondary energy resources

Abstract

Background. Russia has the largest reserves of natural gas in the world. In our country, trunk gas pipelines are traditionally used to deliver natural gas from the extraction site to consumers. The construction, maintenance and operation of trunk gas pipelines require considerable financial resources, so reducing the costs of pumping natural gas by increasing the energy efficiency of gas turbine units due to integrated use of secondary energy resources is of considerable interest.

Materials and methods. The conducted studies have been carried out using available methods of thermodynamic calculation of the internal combustion engine cycle, determination of the components of its thermal balance and thermal calculation of equipment for the utilization of secondary thermal energy resources.

Results. After the integrated use of secondary energy resources, an analysis of the expenditure part of the energy balance of the gas turbine unit has been carried out. It has shown that 16,000 kW (41,7 %) of the thermal energy of the incoming part of the energy balance is used to drive the gas compressor, 9,899 kW (25,8 %) is used to drive the low- and high-pressure compressors, 11,311 kW (29,4 %) is discharged with combustion products, and external heat losses amount to 1,152 kW (3 %).

Conclusions. Compared with the basic gas turbine unit, heat losses with combustion products have decreased by 65 %. The energy-saving measures to use secondary energy resources have allowed us to reduce the consumption of natural gas during the operation of the gas turbine unit in the nominal mode compared with the basic gas turbine unit by 23 %. Considering the generation of electric energy due to the use of energy of excess pressure of the flue gas and heat during heating of the network water of the heat supply system of the gas pumping station, 35420 kW or 92,2 % of the supplied energy has been used beneficially.

Key words: gas turbine unit, secondary energy resources, energy efficiency, heat loss, natural gas consumption

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.022-027

Введение. Россия обладает крупнейшими запасами природного газа в мире. По данным Минприроды России, извлекаемые запасы природного газа составляют около 47,7 трлн м³ [1]. Доля газа в общем энергетическом балансе России составляет около 52 %, а при производстве электрической энергии превышает 49 % [1].

Для доставки природного газа от места добычи к потребителям в нашей стране традиционно используются магистральные газопроводы. Сооружение, обслуживание и эксплуатация магистральных газопроводов требует значительных средств, поэтому уменьшение затрат на перекачивание природного газа за счет повышения энергетической эффективности газотурбинных установок при комплексном использовании вторичных энергоресурсов представляет значительный интерес.

Газоперекачивающий агрегат ГПА-Ц-16/76 на базе авиационного привода НК-16СТ в блочно-контейнерном исполнении предназначен для перекачивания природного газа по магистральным газопроводам и спроектирован на рабочее давление нагнетателя 7,45 МПа.

Привод газового компрессора в ГПА-Ц-16/76 осуществляется газотурбинным двигателем НК-16СТ конструкции ОКБ Кузнецова, созданным на базе авиационного двухконтурного двигателя НК-8-2У семейства двигателей НК. Базовый двигатель применялся в качестве силовой установки самолета Ту-154. Конструктивно двигатель состоит из 2 модулей – нагнетателя воздуха и силовой турбины. Нагнетатель осевого типа состоит из 10 ступеней сжатия. Первые 4 ступени составляют компрессор низкого давления,

сжимающий воздух до 0,25 МПа. Остальные 6 ступеней составляют компрессор высокого давления, на выходе из которого давление воздуха достигает 1 МПа.

Принципиальная схема ГТУ ГПА-Ц-16/76 представлена на рис. 1.

Газотурбинная установка ГПА-Ц-16/76 выполнена по схеме с разрезным валом. Турбина газогенератора (ТГГ), состоящая из турбин высокого (ТВД) и низкого (ТНД) давления, служит для привода компрессора, включающего компрессоры низкого (КНД) и высокого (КВД) давления. Силовая турбина (СТ) служит для привода газового компрессора (ГК).

Номинальная мощность на приводном валу силовой турбины при стандартных атмосферных условиях составляет 16 МВт.

Топливом для газотурбинной установки является природный газ из газопровода Уренгой – Сургут – Челябинск, имеющий следующий состав, в объемных %: CH₄ = 98,24 %, C₂H₆ = 0,29 %, C₃H₈ = 0,20 %, C₄H₁₀ = 0,09 %, C₅H₁₂ = 0,04 %, CO₂ = 0,14 %, N₂ = 1,00 % [2].

Низшая рабочая теплота сгорания природного газа составляет Q_{нр}⁰ = 35703 кДж/м³, теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания газа, – V⁰ = 9,53 м³/м³, теоретический объем продуктов сгорания – V_{нс}⁰ = 10,529 м³/м³. Коэффициент избытка воздуха при работе ГТУ ГПА-Ц-16/76 составляет α = 3,14. Показатель адиабаты продуктов сгорания – k = 1,32.

Температура продуктов сгорания на входе в газовую турбину составляет 850 °С, на выходе турбины газогенератора – 620 °С, а на выходе силовой турбины – 370 °С.

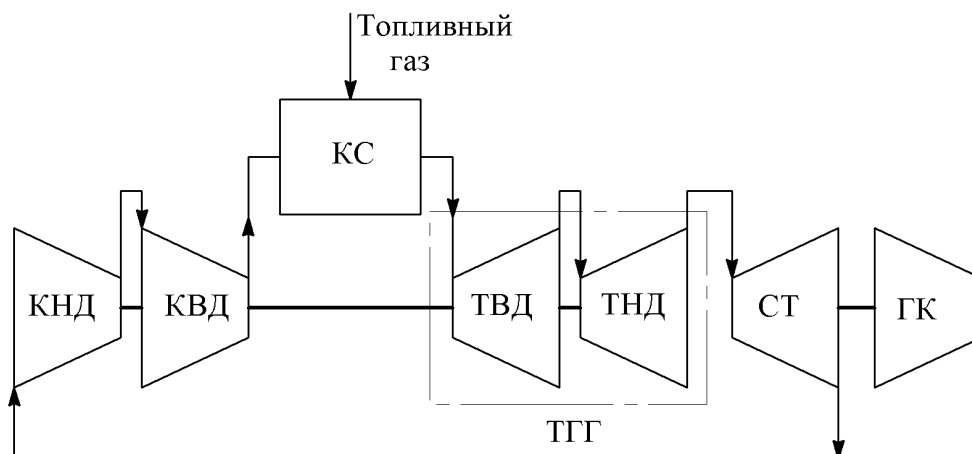


Рис. 1. Принципиальная схема ГТУ ГПА-Ц-16/76

Целью исследования является повышение энергетической эффективности газотурбинной установки за счет комплексного использования вторичных энергоресурсов в виде продуктов сгорания.

Методы исследования. Исследование системы утилизации теплоты газопоршневой установки выполнено с использованием известных методик термодинамического расчета цикла двигателя внутреннего сгорания, определения составляющих его теплового баланса и теплового расчета оборудования для утилизации вторичных тепловых энергетических ресурсов.

Расход топлива газовой турбины ГПА-Ц-16/76 определяется на основании уравнения ее топливно-энергетического баланса:

$$Q_{\text{тр}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{в}} = Q_{\text{пи.ст}} + Q_{\text{пи.гг}} + \Delta Q_{\text{ух}} + \Delta Q_{\text{окр}},$$

где $Q_{\text{тр}}$ – располагаемая теплота топлива, кВт; $Q_{\text{т}}$ – теплота, внесенная с топливом, кВт; $Q_{\text{в}}$ – теплота, внесенная с воздухом, кВт; $Q_{\text{пи.ст}}$ – теплота, полезно использованная в силовой турбине для привода газового компрессора и эквивалентная ее эффективной мощности, кВт; $Q_{\text{пи.гг}}$ – теплота, полезно использованная в турбине привода газогенератора, кВт; $\Delta Q_{\text{ух}}$ – потери теплоты с продуктами сгорания, кВт; $\Delta Q_{\text{окр}}$ – потери теплоты в окружающую среду, кВт.

Потери теплоты в окружающую среду в расчете принимались в количестве 3 % от подведенной теплоты.

Расход природного газа газотурбинной установки ГПА-Ц-16/76 при работе на номинальном режиме составил 1,2 м³/с.

Результаты расчета расходной части баланса ГТУ представлены на рис. 2.

Анализ расходной части энергетического баланса газотурбинной установки показал, что для привода газового компрессора используется 16000 кВт (32,6 %) тепловой энергии приходной части энергетического баланса, для приводов компрессоров низкого и высокого давления используется 12912 кВт (26,3 %), с продуктами сгорания отводится 18693 кВт (38,1 %), а потери в окружающую среду составляют 1472 кВт (3 %).

Согласно классификации тепловых потерь [3], продукты сгорания на выходе силовой турбины с температурой 370 °С относятся к среднеспотенциальным тепловым вторичным энергетическим ресурсам.

Особенностью работы ГТУ на базе агрегата ГПА-Ц-16/76 является значительное давление отбираемого из магистрального газопровода природного газа. В соответствии с техническими характеристиками агрегата, номинальное давление газа на входе в газовый нагнетатель составляет 5,17 МПа.

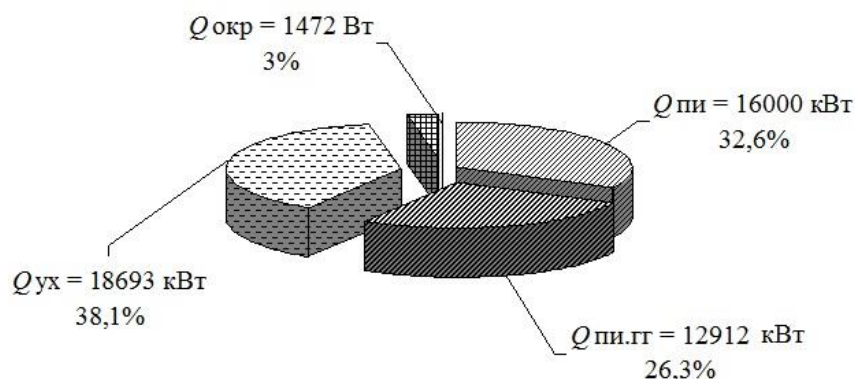


Рис. 2. Расходная часть баланса ГТУ до модернизации

Понижение давления природного газа до давления дутьевого воздуха после компрессора высокого давления 1 МПа происходит за счет дросселирования в редукционных клапанах газораспределительного пункта станции. Снижение давления при дросселировании происходит без совершения работы, т.е. имеют место непроизводительные потери энергии.

Отбираемый из магистрального газопровода природный газ можно использовать в качестве вторичного энергоресурса повышенного давления.

Анализ технической литературы [4–10] показал, что в настоящее время проблеме повышения энергетической эффективности ГТУ на газоперекачивающих станциях за счет использования вторичных энергоресурсов уделяется большое внимание.

Для комплексного использования вторичных энергоресурсов ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76 предложена схема, представленная на рис. 3. В ней продукты сгорания после силовой турбины 10 направляются в регенератор 8, в котором происходит нагрев воздуха после компрессора высокого давления.

После регенератора 8 продукты сгорания направляются в подогреватель топливного газа 3

для его нагрева перед детандером 6 и предотвращения выпадения кристаллогидратов и повышения хрупкости проточной части детандера и газопровода.

В детандере 6 потенциальная энергия повышенного давления природного газа преобразуется в механическую работу на валу турбины. Вал турбины детандера 6 связан с валом электрогенератора 5, в котором вырабатывается электрический ток. Электрический ток направляется в электрическую сеть газоперекачивающей станции. Давление топливного газа после детандера составляет 1,2 МПа, дальнейшее понижение давления происходит в редукционных клапанах газораспределительного пункта станции.

Топливный газ после детандера 6 направляется в камеру сгорания 9 газотурбинной установки.

После подогревателя топливного газа 3 продукты сгорания направляются в подогреватель 4, в котором происходит нагрев сетевой воды системы теплофикации газоперекачивающей станции.

Для регенеративного подогрева дутьевого воздуха и подогрева топливного газа перед детандером используем трубчатые гладкотрубные подогреватели с многократным поперечным обтеканием труб продуктами сгорания.

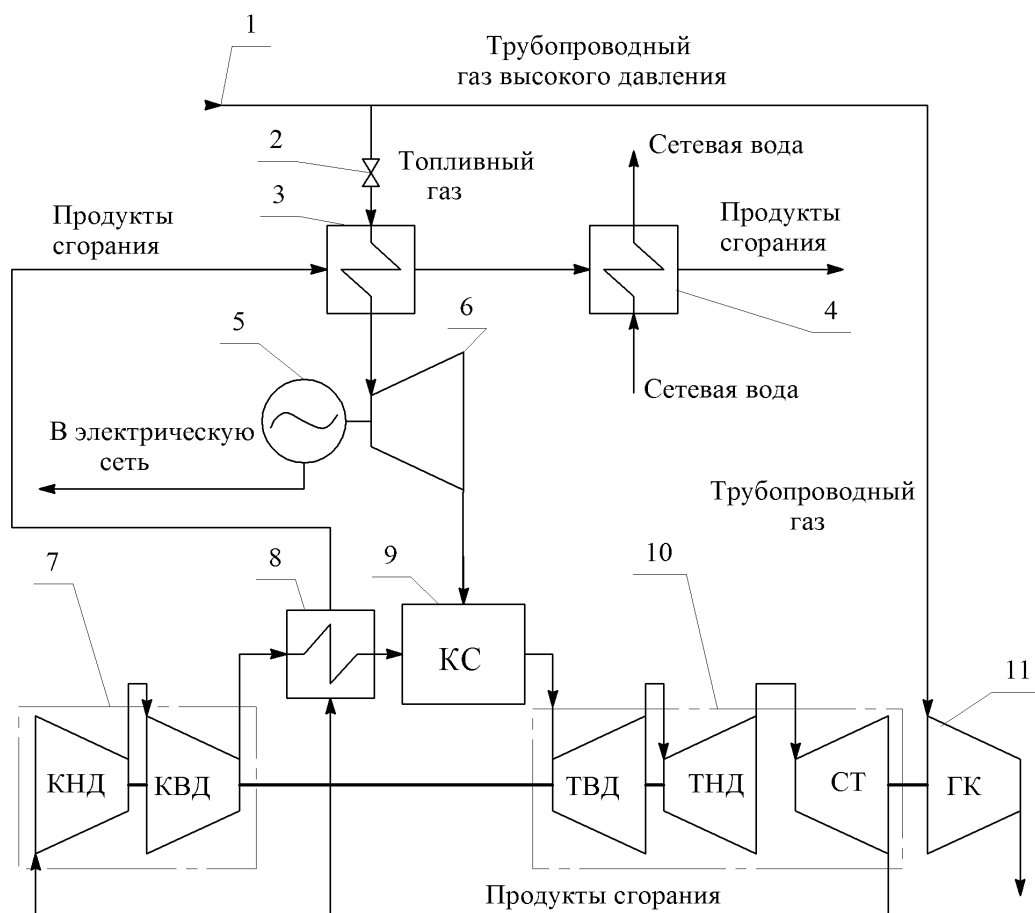


Рис. 3. Структурная схема комплексного использования вторичных энергоресурсов на ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76

Площадь поверхности теплообмена регенеративного подогревателя воздуха составляет 3308 м², температура продуктов сгорания на выходе подогревателя – 307 °С, а воздуха – 310 °С. Площадь поверхности теплообмена подогревателя топочного газа составляет 153 м², температура продуктов сгорания на выходе подогревателя – 296 °С.

Для подогрева сетевой воды используется трубчатый змеевиковый подогреватель с поперечным внешним обтеканием продуктами сгорания. Площадь поверхности теплообмена подогревателя сетевой воды составляет 772 м², температура продуктов сгорания на выходе подогревателя – 110 °С, а воды – 90 °С.

Результаты исследования. Распределение полученных в результате проведенной модернизации ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76, включающего газотурбинный двигатель НК-16СТ мощностью 16 МВт, энергетических ресурсов представлено на рис. 4, где

$Q_p = 3148$ кВт – теплота, переданная в регенераторе дутьевому воздуху; $Q_{п.г} = 567$ кВт – теплота, переданная в подогревателе топливному газу; $N = 220$ кВт – мощность на валу турбодетандера; $Q_{п.в} = 9301$ кВт – теплота, переданная в подогревателе сетевой воде системы теплоснабжения.

Теплота, переданная дутьевому воздуху Q_p и топливному газу $Q_{п.г}$, используется в самой ГТУ, а теплота, переданная сетевой воде $Q_{п.в}$, и мощность на валу турбодетандера N используются внешними потребителями.

Регенеративное (внутреннее) использование энергии вторичных энергоресурсов ГТУ составляет 28 %, а внешнее – 72 %.

Расход природного газа газотурбинной установкой ГПА-Ц-16/76 после комплексного использования вторичных энергоресурсов составил 0,92 м³/с.

Результаты расчета расходной части баланса ГТУ представлены на рис. 5.

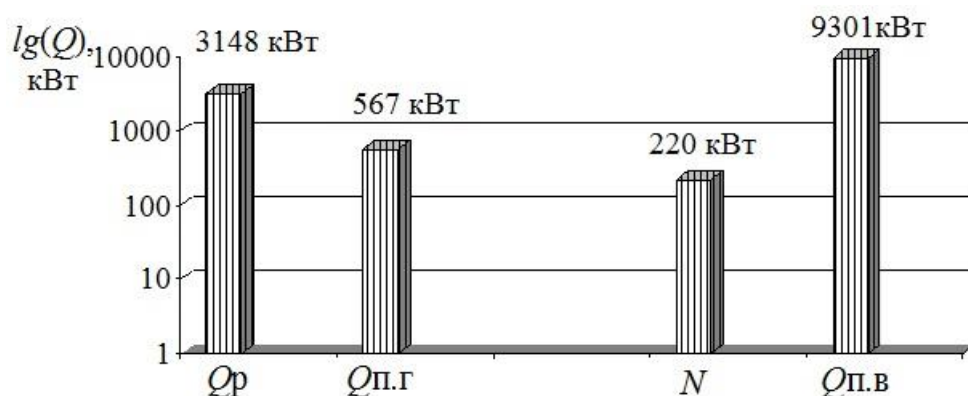


Рис. 4. Диаграмма энергетических ресурсов, полученных в результате проведенной модернизации ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76

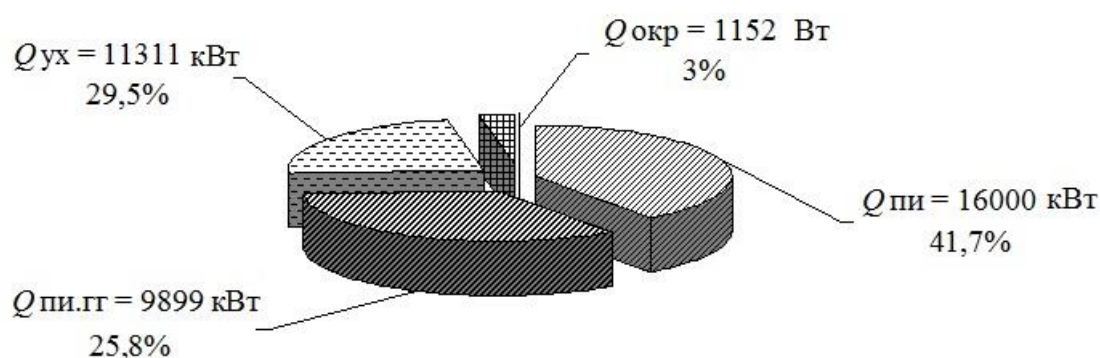


Рис. 5. Расходная часть баланса ГТУ после использования вторичных энергоресурсов

Выводы. Проведенные балансовые исследования перераспределения теплоты ГТУ за счет ее ступенчатой утилизации показали, что для привода газового компрессора используется 16000 кВт (41,7 %) тепловой энергии приходной части энергетического баланса, для привода компрессоров низкого и высокого давления – 9899 кВт (25,8 %), с продуктами сгорания

отводится 11311 кВт (29,4 %), а потери в окружающую среду составляют 1152 кВт (3 %).

Потери теплоты с продуктами сгорания по сравнению с базовой ГТУ уменьшились с 18693 до 11311 кВт, или на 65 %.

Проведенные энергосберегающие мероприятия по внутреннему использованию ВЭР позволили уменьшить расход природного газа

при работе ГТУ на номинальном режиме по сравнению с базовой ГТУ с 1,2 до 0,92 м³/с, или на 23 %.

С учетом выработки электрической энергии за счет использования энергии избыточного давления топочного газа и тепла при нагреве сетевой воды системы теплоснабжения газоперекачивающей станции полезно использовано 35420 кВт, или 92,2 %, подведенной энергии.

Список литературы

1. Семикашев В.В., Гайворонская М.С. Анализ состояния и перспектив развития российской газовой отрасли до и после 2022 г. // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2022. – С. 108–127.
2. Абрютин А.А., Карасина Э.С. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во ВТИ и НПО «ЦКТИ», 1998. – 258 с.
3. Куперман Л.И., Романовский С.А., Сидельковский Л.Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 303 с.
4. Повышение эффективности использования газа на компрессорных станциях / В.А. Динков, А.И. Гриценко, Ю.И. Васильев, П.М. Мужиливский. – М.: Недра, 1981. – 283 с.
5. Никишин В.И. Энергосберегающие технологии в трубопроводном транспорте природных газов. – М.: Нефть и газ, 1998. – 349 с.
6. Поршаков Б.П., Апостолов А.А., Никишин В.И. Газотурбинные установки. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 240 с.
7. Равич М.Б. Расчет ресурсов вторичного тепла продуктов сгорания ГТУ КС // Экспресс-информация. Подготовка, переработка и использование газа. – М., 1987. – С. 8–11.
8. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В. Газотурбинные установки для транспорта природного газа / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2010. – 217 с.
9. Широков В.А. Установка комплексного использования газа для агротеплофикации на базе КС // Теплоснабжение и вентиляция агропромышленного комплекса: сб. науч. ст. – Ростов н/Д, 1988. – С. 133–136.
10. Юращик И.Л., Глущенко Л.Ф., Маторин А.С. Утилизация теплоты приводных газотурбинных установок. – Киев: Техника, 1991. – 152 с.

References

1. Semikashev, V.V., Gayvoronskaya, M.S. Analiz sostoyaniya i perspektiv razvitiya rossiyskoy gazovoy otrasli do i posle 2022 g. [Analysis of the state and prospects for the development of the Russian gas industry before and after 2022]. *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN*, 2022, pp. 108–127.
2. Abryutin, A.A., Karasina, E.S. *Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov (Normativnyy metod)* [Thermal calculation of boiler units (Standard method)]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo VTI i NPO «TsKTI», 1998. 258 p.
3. Kuperman, L.I., Romanovskiy, S.A., Sidel'kovskiy, L.N. *Vtorichnye energoresursy i energotekhnologicheskoe kombinirovanie v promyshlennosti* [Secondary energy resources and energy-technological combination in industry]. Kiev: Vishcha shkola. Golovnoe izdatel'stvo, 1986. 303 p.
4. Dinkov, V.A., Gritsenko, A.I., Vasil'ev, Yu.I., Muzhilivskiy, P.M. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya gaza na kompressornykh stantsiyakh* [Increasing the efficiency of gas use at compressor stations]. Moscow: Nedra, 1981. 283 p.
5. Nikishin, V.I. *Energoberegayushchie tekhnologii v truboprovodnom transporte prirodnkh gazov* [Energy-saving technologies in pipeline transport of natural gases]. Moscow: Neft' i gaz, 1998. 349 p.
6. Porshakov, B.P., Apostolov, A.A., Nikishin, V.I. *Gazoturbinnye ustanovki* [Gas turbine units]. Moscow: GUP Izdatel'stvo «Neft' i gaz» RGU nefiti i gaza im. I.M. Gubkina, 2003. 240 p.
7. Ravich, M.B. *Raschet resursov vtorichnogo tepla produktov sgoraniya GTU KS* [Calculation of secondary heat resources of combustion products of gas turbine compressor plants]. *Ekspress-informatsiya. Podgotovka, pererabotka i ispol'zovanie gaza* [Express information. Preparation, processing and use of gas]. Moscow, 1987, pp. 8–11.
8. Rudachenko, A.V., Chukhareva, N.V. *Gazoturbinnye ustanovki dlya transporta prirodnogo gaza* [Gas turbine installations for natural gas transport]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 217 p.
9. Shirokov, V.A. *Ustanovka kompleksnogo ispol'zovaniya gaza dlya agroteploffikatsii na baze KS* [Installation of integrated gas use for agroheating on the basis of a compressor station]. *Sbornik nauchnykh statey «Teplosnabzhenie i ventilyatsiya agropromyshlennogo kompleksa»* [Collection of scientific articles "Heat supply and ventilation of the agro-industrial complex"]. Rostov-on-Don, 1988, pp. 133–136.
10. Yurashchik, I.L., Glushchenko, L.F., Matorin, A.S. *Utilizatsiya teploty privodnykh gazoturbinnnykh ustanovok* [Utilization of heat from gas turbine drive units]. Kiev: Tekhnika, 1991. 152 p.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Михаил Валерьевич Двойненков

АО «РАДИУС Автоматика»; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер; аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: dmv@rza.ru

Владимир Александрович Шуин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Исследование на имитационной модели параметров режима самозапуска электродвигателей комплексной нагрузки, учитываемых при выборе уставок релейной защиты линий высокого напряжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. При выборе уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП высокого напряжения должны учитываться параметры режима самозапуска электродвигателей нагрузки, характеризующиеся коэффициентом увеличения тока в защищаемой линии $K_{зап}$ и углом $\varphi_{зап}$ полного сопротивления нагрузки. В существующих методиках выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП, как правило, приводятся только ориентировочные значения коэффициента $K_{зап}$, а угол $\varphi_{зап}$ часто принимается равным углу сопротивления на «зажимах» защиты в максимальном рабочем режиме $\varphi_{раб}$ без учета самозапуска электродвигателей потребителей. Погрешности, обусловленные неточностью определения параметров $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$, могут быть причиной снижения селективности и чувствительности резервных ступеней дистанционных защит, т.е. эффективности дальнего резервирования. Для уточнения существующих методик выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит актуальной задачей является исследование зависимостей параметров режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ от доли и типа двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки.

Материалы и методы. Для исследования зависимостей параметров режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ от доли и состава двигательной нагрузки в комплексной нагрузке использован программный комплекс MATLAB с входящим в него пакетом SimPowerSystems, предназначенным для моделирования электротехнических устройств и систем. Модель исследуемого объекта включает источник питания напряжением 110(220) кВ, ЛЭП 110(220) кВ с понижающим трансформатором 110(220)/6(10) кВ в конце линии, участок сети 6(10) кВ с кабельными линиями для питания группы высоковольтных асинхронных электродвигателей и понижающим трансформатором 6(10)/0,4 кВ для питания группы низковольтных асинхронных электродвигателей. Параметрирование модели произведено с учетом реальных характеристик ее элементов и методик расчета параметров схем замещения.

Результаты. Предложен подход к приближенному расчету параметров самозапуска на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки с делением нагрузки на три категории: высоковольтные асинхронные электродвигатели, низковольтные асинхронные электродвигатели и статическая нагрузка. Показано, что основными факторами, влияющими на параметры режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ на ЛЭП 110–220 кВ, являются доли высоковольтных асинхронных электродвигателей $K_{адв}$, низковольтных асинхронных электродвигателей $K_{адн}$ и их соотношение в составе комплексной нагрузки. Получены зависимости параметров режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ от доли двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки, а также зависимость $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$.

Выводы. Полученные зависимости $K_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$, $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$ и $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{зап}})$ могут быть использованы для уточнения методик расчета уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП 110–220 кВ, что повысит эффективность дальнего резервирования в электрических сетях высокого напряжения.

Ключевые слова: ЛЭП высокого напряжения, релейная защита, дальнее резервирование, дистанционная защита, комплексная нагрузка, режим самозапуска, электродвигатель

Mikhail Valeryevich Dvoynenkov

JSC "RADIUS Avtomatika", Engineer, Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dmvmv@rza.ru

Vladimir Alexandrovich Shuin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Study of self-starting mode parameters of complex load electric motors on a simulation model taken into account when selecting relay protection settings of high-voltage transmission lines

Abstract

Background. When selecting the settings for the backup stages of distance protection of the electric power transmission lines, we should consider the parameters of the self-starting mode of load electric motors, characterized by the K_{str} coefficient of current increase in the protected line and the φ_{str} angle of the load impedance. The available methods for selecting the settings of the backup stages of the line distance protection, as a rule, consider only the approximate values of the K_{str} coefficient. The φ_{str} angle is often assumed to be equal to the φ_{oper} angle of impedance at the "terminals" of protection in the maximum operating mode without considering the self-starting of the load motors. Errors caused by the inaccuracy of determining the parameters K_{str} and φ_{str} may be the reason for a decrease in the selectivity and sensitivity of the backup stages of the line distance protection, i.e. the effectiveness of remote backup. To clarify the available methods for selecting the settings of the line distance protection, an urgent task is to study the dependencies of the parameters of the self-starting mode K_{str} and φ_{str} on the proportion and type of motor load as a part of the complex load.

Materials and methods. To study the dependencies of the parameters K_{str} and φ_{str} of the self-starting mode on the proportion and composition of the motor load in the complex load the MATLAB software package is used with the SimPowerSystems package, designed for modeling electrical devices and systems. The model of the object under study includes a 110(220) kV power supply, a 110(220) kV line with a 110(220)/6(10) kV step-down transformer at the end of the line, a 6(10) kV network section with cable lines for supplying a group of high-voltage asynchronous electric motors (AMHV) and a 6(10) kV step-down transformer 6(10)/0,4 kV for supplying a group of low voltage asynchronous electric motors (AMLV). The parameterization of the model has been carried out considering the real characteristics of its elements and methods for calculating the parameters of equivalent circuits.

Results. The authors have proposed an approach to approximate calculation of self-starting parameters based on data about the typical consumers of a complex load node with load division into three categories: AMHV, AMLV and static load. It is shown that the main factors influencing the parameters K_{str} and φ_{str} of the self-starting mode on 110–220 kV transmission lines are the proportions of AMHV K_{AMHV} , AMLV K_{AMLV} and their ratio in the complex load. The dependencies of the parameters K_{str} and φ_{str} of the self-starting mode on the proportion of the motor load in the complex load, as well as the dependence $\varphi_{\text{str}} = f(K_{\text{str}})$, are obtained.

Conclusions. The obtained dependencies $K_{\text{str}} = f(K_{\text{AMHV}}, K_{\text{AMLV}})$, $\varphi_{\text{str}} = f(K_{\text{AMHV}}, K_{\text{AMLV}})$ and $\varphi_{\text{str}} = f(K_{\text{str}})$ can be used to clarify the methods to calculate the settings of backup stages of 110–220 kV line distance protection. It will increase the efficiency of remote backup in high-voltage electric networks.

Key words: high-voltage power transmission lines, relay protection, remote backup, distance protection, complex load, self-starting mode, electric motor

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.028-038

Введение. Дистанционные защиты (ДЗ) со ступенчато-зависимыми характеристиками времени срабатывания получили широкое применение в качестве защит дальнего резервирования (ДР) при междуфазных коротких замыканиях (КЗ) на ЛЭП напряжением 110–220 кВ с двусторонним и односторонним питанием [1, 2]. Одним из основных факторов, ограничивающих селективность несрабатываний в нагрузочных режи-

мах без КЗ и чувствительность при внутренних КЗ резервных ступеней ДЗ (т.е. и эффективность ДР), являются режимы, связанные с самозапуском электродвигателей (ЭД) в составе комплексной нагрузки.

Режимы самозапуска ЭД сопровождаются значительным увеличением модулей и аргументов тока в защищаемой линии по сравнению с нормальными нагрузочными режимами,

что приводит к утяжелению условий выбора параметров срабатывания резервных защит ЛЭП. Характер протекания режима самозапуска зависит от длительности перерыва питания, типа двигательной нагрузки (высоковольтные асинхронные, низковольтные асинхронные, синхронные ЭД), доли двигательной нагрузки того или иного типа в составе комплексной нагрузки [3, 4]. Основными параметрами, характеризующими режимы самозапуска ЭД, при выборе уставок резервных ступеней ДЗ являются:

– коэффициент, учитывающий увеличение тока при самозапуске ЭД (коэффициент самозапуска):

$$K_{\text{зап}} = \frac{I_{\text{зап. макс}}}{I_{\text{раб. макс}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{зап. макс}}$ – максимальный ток в режиме самозапуска ЭД; $I_{\text{раб. макс}}$ – максимальный рабочий ток в защищаемой линии;

– расчетное минимальное сопротивление на «зажимах» ДЗ в режиме самозапуска ЭД:

$$Z_{\text{зап}} = \frac{U_{\text{мин}}}{\sqrt{3} I_{\text{зап. макс}}} \approx \frac{(0,8 - 0,9) U_{\text{раб. мин}}}{\sqrt{3} K_{\text{зап}} I_{\text{раб. макс}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{мин}}$ – минимальное значение первичного напряжения в месте установки защиты в условиях самозапуска ЭД; $U_{\text{раб. мин}}$ – минимальное рабочее напряжение на шинах источника питания;

– угол расчетного сопротивления на «зажимах» ДЗ в режиме самозапуска ЭД:

$$\varphi_{\text{зап}} = \arg(Z_{\text{зап}}). \quad (3)$$

Наиболее эффективное решение в части повышения отстроенности от режимов самозапуска ЭД и чувствительности резервных защит при внутренних КЗ в зоне ДР обеспечивается применением современных микропроцессорных исполнений ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания.

На рис. 1 в качестве примера приведены формы полигональных характеристик срабатывания резервных ступеней ДЗ НПП «ЭКРА», применяемых в шкафах релейной защиты и автоматики (РЗА) серии ШЭ2607 для ЛЭП 110–220 кВ, и реализуемые при их использовании способы отстройки от режимов самозапуска ЭД.

Отстройка от режимов самозапуска ЭД по углу наклона стороны OD $\varphi_2 > \varphi_{\text{зап.1}}$ для характеристики срабатывания по рис. 1,а или $\varphi_{\text{нагр}} > \varphi_{\text{зап.1}}$ для характеристики по рис. 1,б может применяться при небольшой доле двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки и, соответственно, небольших значениях угла $\varphi_{\text{зап.1}} < \sim 45^\circ$. Преимуществом этих характеристик срабатывания (рис. 1,а и 1,б) является возможность обеспечения высокой чувствительности при КЗ в зоне ДР через переходное сопротивление. Характеристика срабатывания с применением «выреза» активной нагрузки $R_{\text{нагр}}$ (рис. 1,б) обеспечивает также фиксацию близких к месту установки защиты КЗ через переходное сопротивление. Характеристика срабатывания на рис. 1,в и реализуемые при ее применении способы отстройки от режимов самозапуска ЭД применяются при больших значениях угла $\varphi_{\text{зап.2(3)}}$, превышающих 45° .

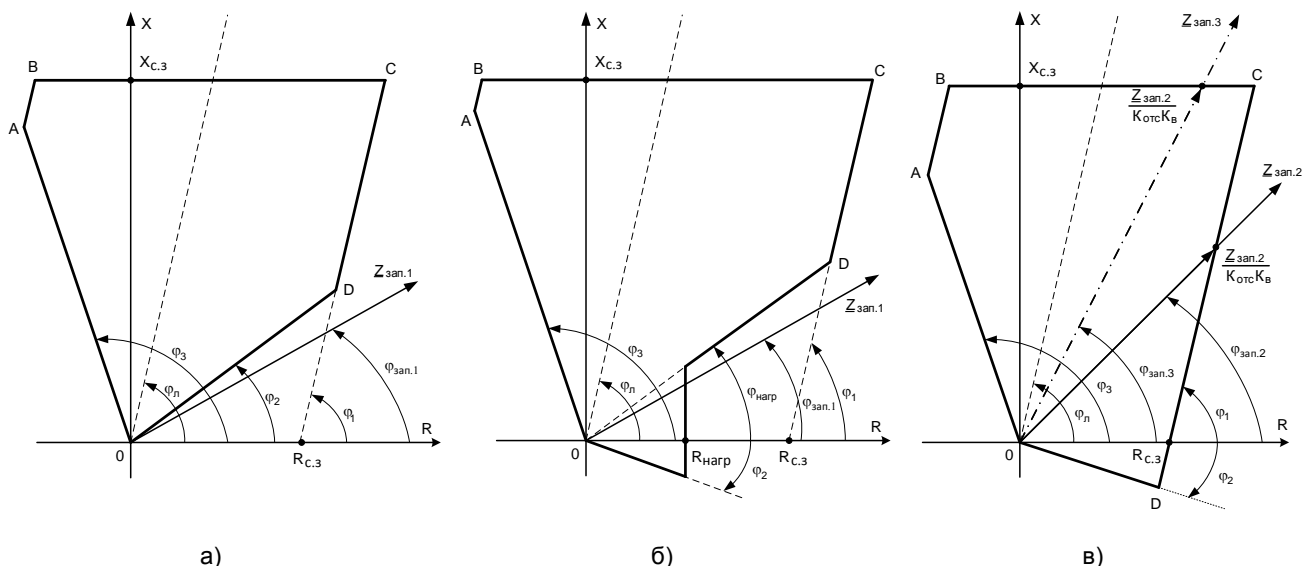


Рис. 1. Формы характеристик срабатывания и способы отстройки от режимов самозапуска ЭД резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110–220 кВ: $X_{\text{с.з.}}$, $R_{\text{с.з.}}$, $R_{\text{нагр}}$, φ_1 – φ_3 , $\varphi_{\text{нагр}}$ – параметры настройки характеристик срабатывания (уставки); $\varphi_{\text{л}}$ – угол сопротивления защищаемой линии; $Z_{\text{зап}}$ – сопротивление на «зажимах» защиты в режиме самозапуска ЭД; $\varphi_{\text{зап}}$ – угол сопротивления $Z_{\text{зап}}$; а – отстройка по углу наклона правой нижней стороны OD характеристики срабатывания (выбором уставки $\varphi_2 > \varphi_{\text{зап.1}}$); б – отстройка с применением «выреза» активной нагрузки (выбором уставок $R_{\text{нагр}}$ и $\varphi_{\text{нагр}} > \varphi_{\text{зап.1}}$); в – отстройка с применением правой боковой стороны CD характеристики срабатывания (выбором уставок $R_{\text{с.з.}}$, φ_1 и φ_2) или верхней стороны BC характеристики срабатывания (выбором уставки $X_{\text{с.з.}}$)

Отстройка от замеров ДЗ в режимах самозапуска ЭД, характеризующихся значениями угла $\varphi_{\text{зап.2}} > \sim 45^\circ$, когда вектор $\underline{Z}_{\text{зап.2}}$ пересекает правую боковую сторону CD характеристики срабатывания, обеспечивается соответствующим выбором уставки $R_{\text{с.з}}$ и угла наклона правой боковой стороны φ_1 . При больших значениях угла $\varphi_{\text{зап.3}}$ в режимах самозапуска со значительным перетоком реактивной мощности по защищаемой ЛЭП, когда вектор $\underline{Z}_{\text{зап.3}}$ пересекает верхнюю границу ВС характеристики срабатывания, несрабатывание резервной ступени ДЗ обеспечивается выбором уставки $X_{\text{с.з}}$.

Для выбора параметров настройки полигональной характеристики срабатывания резервных ступеней ДЗ (рис. 1) должны быть определены значения $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$ в расчетном наиболее тяжелом режиме самозапуска двигательной нагрузки (минимальное значение первичного сопротивления в месте установки защиты $Z_{\text{зап}}$ при известном значении $K_{\text{зап}}$ определяется по (2)).

В существующих методиках выбора уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП, как правило, приводятся только ориентировочные значения коэффициента $K_{\text{зап}}$, а угол $\varphi_{\text{зап}}$ часто принимается равным углу сопротивления на «зажимах» защиты в максимальном рабочем режиме $\varphi_{\text{раб}} = 25\text{--}35^\circ$ без учета самозапуска ЭД.

Например, в широко применяемых методиках [5, 6] указано, что $K_{\text{зап}}$ ориентировочно принимается равным 1,5–2,0 (при определенных условиях в некоторых методиках $K_{\text{зап}}$ может быть увеличен до 2,5 или уменьшен до 1,2–1,3) и должен уточняться расчетами для конкретных условий, что не всегда возможно на стадии разработки проектной документации. Погрешности, обусловленные неточностью определения параметров $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$, могут быть причиной уменьшения эффективности ДР.

При отсутствии специальных расчетных программ практически невозможно для каждой ЛЭП определить точно параметры режима самозапуска $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$, так как их значения, как уже отмечалось выше, зависят от многих факторов (состава и режимов работы комплексной нагрузки питаемых по защищаемой линии подстанций; доли и состава двигательной нагрузки; длительности и степени снижения напряжения при перерыве питания и др.). В связи с этим при расчетах указанных параметров в целях выбора уставок РЗА, как правило, применяются упрощенные методы, основанные на использовании ряда допущений. Наиболее широкое применение получил метод приближенного расчета параметров режима самозапуска ЭД, предложенный в [7] и подробно описанный (с примерами расчетов) в работах М.А. Шабада [8, 9], основанный на использовании следующих допущений:

1) все двигатели, участвующие в самозапуске, к моменту восстановления напряжения питания на выводах ЭД практически полностью

заторможены (что справедливо при перерыве питания на несколько секунд);

2) подключенная комплексная нагрузка разделяется на три условные категории:

– бытовая нагрузка, имеющая в своем составе незначительную долю асинхронных двигателей низкого напряжения менее 1 кВ (АДН), коэффициент самозапуска для которой, по опытом данным, принимается равным $K_{\text{зап}} \approx 1,2\text{--}1,3$;

– обобщенная нагрузка (комплексная, как правило промышленная), имеющая в своем составе значительную долю (более 50 %) АДН, учитываемая в расчетах обобщенным сопротивлением $X_{\text{нагр}} = 0,35$ ($K_{\text{зап}} \approx 2,9$);

– асинхронные двигатели высокого напряжения 3–10 кВ (АДВ), учитываемые параметрами обобщенного (эквивалентного) двигателя, определенными по индивидуальным параметрам всех АДВ;

3) все АДН в составе бытовой и обобщенной промышленной нагрузки остаются подключенными к сети при перерывах питания и вместе с АДВ участвуют в самозапуске.

В то же время известно, что самозапуск низковольтных двигателей большинства механизмов промышленных предприятий недопустим по условиям безопасности обслуживающего персонала, из-за опасности поломки механизма или брака продукции и других причин, поэтому при значительном снижении напряжения в сети или его исчезновении АДН, как правило, должны автоматически отключаться [4]. Для этого значительная часть АДН включается через магнитные пускатели, контакторы или автоматические выключатели с расцепителями минимального напряжения и поэтому не принимает участие в самозапуске двигательной нагрузки. В тех случаях, когда допустимо и целесообразно участие АДН в самозапуске, применяются автоматическое повторное включение низковольтных ЭД, ввод задержки по времени, сохраняющей контактор включенным, или автоматические выключатели с сохранением включенного положения в режиме самозапуска.

С учетом изложенного выше можно сделать вывод, что возможности применения традиционного подхода для определения параметров режима самозапуска ЭД [7–9] при расчетах уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110–220 кВ ограничены его следующими недостатками:

– метод ориентирован в основном на расчеты $K_{\text{зап}}$, что приемлемо только при выборе уставок максимальных токовых защит (МТЗ);

– при проектировании не всегда доступны исходные данные по точному составу комплексной нагрузки питаемых по защищаемой ЛЭП промежуточных и ответственных подстанций, обеспечивающие возможность ее разделения на указанные выше три условные категории;

– не учитывается действительная доля АДН, принимающих участие в самозапуске ЭД;

– не учитывается влияние длительности перерыва питания ЭД на параметры режима самозапуска;

– расчет самозапуска ЭД выполняется по упрощенной, чисто реактивной схеме замещения, что не позволяет определить угол $\varphi_{\text{зап}}$.

Отметим также, что в некоторых случаях при расчетах самозапуска ЭД применяются и более простые методы, не учитывающие влияния АДН [4]. Такой подход позволяет разделить комплексную нагрузку на две условные категории: АДВ и статическую нагрузку, сопротивление которой при самозапуске остается практически неизменным, что существенно упрощает методику приближенных расчетов параметров $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$ режима самозапуска двигательной нагрузки. В [2] с использованием данного подхода и исходных данных о соотношении долей АДВ и статической нагрузки получены достаточно простые аналитические выражения для расчета $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$. Основные недостатки данного метода заключаются в невозможности учета при необходимости влияния на параметры режима самозапуска наличия АДН, длительности перерыва питания ЭД и параметров элементов (линий, трансформаторов) схемы электроснабжения двигательной нагрузки.

Таким образом, рассмотренные упрощенные методы учитывают ограниченное число факторов, влияющих на параметры режима самозапуска, и не во всех случаях могут обеспечить приемлемую точность расчетов $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$, используемых при расчетах уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП высокого напряжения.

Метод приближенного расчета параметров $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$ на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки. При отсутствии достоверных данных об относительном составе потребителей узла комплексной нагрузки в [10] рекомендуется использовать типовой состав нагрузки отдельных отраслей народного хозяйства, выраженный в процентах от суммарной установленной мощности в рассматриваемом узле. При использовании в расчетах самозапуска ЭД данных о типовом составе комплексной нагрузки достаточно знать, к какой отрасли (отраслям) относятся потребители питаемых по защищаемой ЛЭП промежуточных и ответвительных подстанций и их суммарную установленную мощность.

При выполнении расчетов самозапуска ЭД на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки последнюю целесообразно разделить на три следующие условные категории:

1) АДВ, учитываемые параметрами обобщенного двигателя, определенными по индивидуальным параметрам всех участвующих в самозапуске ЭД напряжением 3–10 кВ;

2) АДН, учитываемые параметрами обобщенного двигателя напряжением менее 1 кВ;

3) статическая нагрузка (электрическое освещение, электротермические установки, преобразователи и прочая нагрузка).

Предложенный подход позволяет:

– обеспечить приближенный расчет параметров режима самозапуска ЭД при отсутствии достоверных данных по составу потребителей комплексной нагрузки;

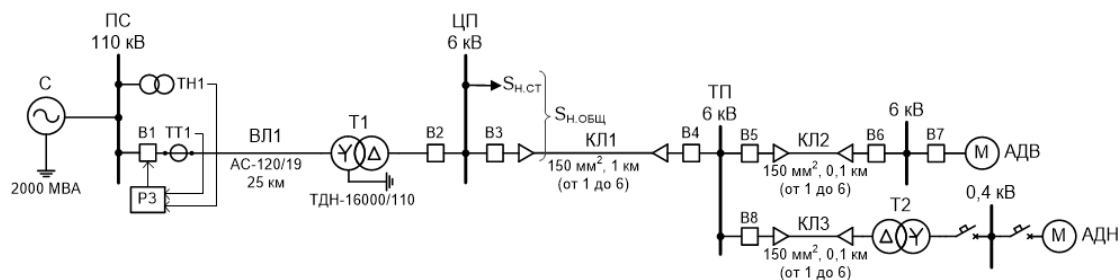
– повысить точность расчетов параметров режима самозапуска ЭД при наличии данных о реальном составе потребителей комплексной нагрузки;

– учитывать большее число факторов, влияющих на самозапуск ЭД, обеспечивая повышение точности расчетов.

Целью настоящего исследования является разработка на основе предложенного подхода методики и расчетной модели для определения параметров режима самозапуска ЭД $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$, анализ их зависимости от доли высоковольтных $K_{\text{АДВ}}$ и низковольтных $K_{\text{АДН}}$ двигателей в составе комплексной нагрузки ($K_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$, $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$), а также построение зависимостей $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{зап}})$ для проверки обоснованности и при необходимости уточнения существующих рекомендаций по их выбору при расчетах уставок срабатывания резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110–220 кВ.

Материалы и методы. Повышение точности расчетов параметров режима самозапуска ЭД возможно только за счет усложнения расчетной модели защищаемого объекта и применения соответствующих методов расчета. Наиболее доступным методом, не требующим создания специальных расчетных программ, является имитационное моделирование. Для реализации предложенного метода расчета самозапуска ЭД использованы получившие широкое применение для моделирования электротехнических устройств и систем библиотека блоков SimPowerSystems и среда моделирования Simulink программного комплекса MATLAB. С помощью данных средств смоделирован участок электрической сети, содержащий ЛЭП 110–220 кВ и понизительную подстанцию с низшим напряжением 6–10 кВ, в состав комплексной нагрузки которой входят АДВ, АДН и статическая нагрузка.

Схема участка электрической сети для исследования режима самозапуска двигательной нагрузки, ее параметрирование и условия для моделирования. Схема моделируемого участка сети приведена на рис. 2. Участок сети состоит: из источника питания напряжением 110 кВ; ЛЭП с однофазным питанием и понижающим трансформатором с низшим напряжением 6 кВ; статической нагрузки на напряжении 6 кВ (центр питания); участка сети 6 кВ с кабельными линиями для питания группы АДВ, а также участка сети с кабельными линиями 6 кВ и понижающим трансформатором с низшим напряжением 0,4 кВ для питания группы АДН.

Рис. 2. Схема участка сети для исследования параметров $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ ЭД нагрузки

Данная схема может использоваться и при расчете параметров режима самозапуска на линиях с двусторонним питанием, так как при этом расчетным режимом, как правило, является режим одностороннего питания, возникающий после аварии или при ремонте [6].

Анализ схемы на рис. 2 показывает, что комплексная нагрузка разделена на три группы: статическая; высоковольтные асинхронные двигатели; низковольтные асинхронные электродвигатели.

Для исследуемой сети параметрирование производится следующим образом:

- для источника питания в MATLAB задаются междуфазное напряжение и полная мощность;

- параметры воздушных и кабельных ЛЭП, силовых трансформаторов рассчитываются согласно [10, 12];

- коэффициент загрузки понижающих трансформаторов принимается равным 0,7;

- высоковольтная двигательная нагрузка представляется в виде обобщенного асинхронного электродвигателя 6 кВ с параметрами согласно [11]. При наличии данных о типах АДВ в составе нагрузки для определения параметров обобщенного ЭД используются расчетные формулы согласно [8, 9]. Номинальный момент сопротивления приводимого в движение механизма принимается равным 1 о.е.;

- низковольтная двигательная нагрузка представляется в виде асинхронного электродвигателя 0,4 кВ с сопротивлением обобщенной нагрузки $x_{нагр} = 0,35$ о.е [8, 9]. Коэффициент пуска $K_{пуск} \approx 1/x_{нагр} = 1/0,35 \approx 2,9$. Номинальный момент сопротивления приводимого в движение механизма принимается равным 0,7 о.е.;

- момент сопротивления АДВ и АДН изменяется пропорционально квадрату скорости вращения электродвигателя (механизмы вентиляторного типа, насосы, т.е. большинство используемых механизмов), согласно формуле, приведенной в [3] (используется также в методике расчета самозапуска, составленной фирмой ОРГРЭС):

$$M_c = M_{c,нач} + (M_{c,ном} - M_{c,нач}) (\eta_{тек}/\eta_{ном})^2, \quad (4)$$

где $M_{c,нач}$ – начальный момент сопротивления вращающегося механизма (без учета $M_{трения_покоя}$), о.е.; $M_{c,ном}$ – номинальный момент

сопротивления механизма, о.е.; $\eta_{ном}$ – номинальная скорость вращения ЭД, при которой момент сопротивления равен номинальному, об/мин; $\eta_{тек}$ – текущая скорость вращения ЭД, об/мин.

Параметрирование модели производилось с учетом реальных характеристик ее элементов, приведенных в справочных данных, а также с учетом методик расчета параметров схем замещения, при этом учитывались особенности стандартных блоков MATLAB [10, 12].

Для исследуемой сети принимаются следующие условия моделирования самозапуска, полностью учитываемые при построении модели:

- все электродвигатели групп АДВ и АДН участвуют в самозапуске;

- в процессе исследования состав комплексной нагрузки варьируется изменением долей статической нагрузки и двигательной нагрузки АДВ и АДН (для учета влияния на параметры режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ только группы АДВ соответственно отключается группа АДН, и наоборот);

- напряжение, ток и угол между ними измеряются в месте установки защиты – РЗ (рис. 2), также измеряются токи статора, скорость вращения ротора и вращающий электромагнитный момент как для АДВ, так и для АДН;

- самозапуск асинхронных электродвигателей производится при неподвижном состоянии роторов из-за длительного перерыва питания, при этом параметры режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ достигают максимальных значений;

- при исследовании влияния АДВ на $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ рассматриваются также режимы с разными временами перерыва питания, в которых самозапуск осуществляется, когда двигатели еще не успели полностью затормозиться.

Достоверность имитационной модели подтверждалась сравнением полученных на ее основе результатов расчетов параметров режима самозапуска электродвигателей с результатами расчетов, выполненных другими методами, приведенными в [2, 8].

Анализ влияния АДВ на параметры $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$. Рассмотрим влияние доли высоковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки на коэффициент самозапуска и угол самозапуска.

Согласно [10], доля АДВ в составе комплексной нагрузки потребителей различных отраслей народного хозяйства обычно составляет от 5–8 % до 15–20 %. Для отдельных отраслей промышленности доля АДВ может возрастать до 50 % и более, например в нефтедобывающей и газодобывающей отраслях.

Для построения зависимостей $K_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}})$ и $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}})$ необходимо изменять долю АДВ в составе комплексной нагрузки от 0 до 80 % с шагом 5 %. При этом в каждом опыте снимаются временные осциллограммы тока в месте установки защиты, коэффициента самозапуска и угла самозапуска, токов статора, скорости вращения ротора и вращающего электромагнитного момента АДВ.

Как сказано выше, дополнительно при исследовании влияния АДВ на $K_{\text{зап}}$ и $\varphi_{\text{зап}}$ рассматриваются режимы с разными временами перерыва питания. При этом самозапуск АДВ осуществляется при полной остановке двигателей, а также когда они еще не успели полностью затормозиться.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициента самозапуска от доли высоковольтных асинхронных ЭД в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания.

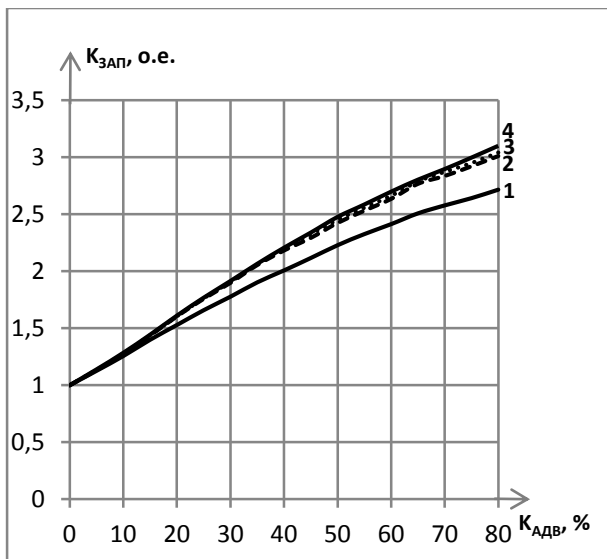


Рис. 3. Зависимость коэффициента самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания: 1 (сплошная линия) – перерыв питания с $t_{\text{пер}} = 0,5$ с; 2 (пунктир, линия) – перерыв питания с $t_{\text{пер}} = 1,5$ с; 3 (пунктир, точка) – перерыв питания с $t_{\text{пер}} = 2,5$ с; 4 – длительный перерыв питания с полной остановкой АДВ

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что при обычной доле АДВ, равной 5–20 %, коэффициент самозапуска достигает значений 1,3–1,7, что примерно соответствует рекомендациям существующих методик. При доле АДВ более 30 % величина $K_{\text{зап}}$ при разных временах перерыва питания уже может не

укладываться в стандартный рекомендованный диапазон 1,5–2,0 и с ростом доли АДВ достигать значений 2,5 и более.

На рис. 4 показана зависимость угла самозапуска от доли высоковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания.

Анализ полученных зависимостей (рис. 4) показывает, что угол самозапуска уже при обычной доле двигательной нагрузки высокого напряжения, равной 5–20 %, может достигать значений до 50° и более, что существенно больше значений угла в нагрузочном режиме (при $\cos\varphi_{\text{нагр}} = 0,8\text{--}0,9$; $\varphi_{\text{нагр}} \approx 25\text{--}35^\circ$). При дальнейшем увеличении доли АДВ, что имеет место для некоторых отраслей промышленности, значение $\varphi_{\text{зап}}$ может достигать 70° и более, что может значительно изменить параметры срабатывания ДЗ линии.

На основе полученных зависимостей $K_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}})$ и $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}})$ возможно выполнить построение зависимости $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{зап}})$.

На рис. 5 показана зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДВ в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДВ из неподвижного состояния после длительного перерыва питания.

С помощью зависимости $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{зап}})$ становится возможным определение при заданном $K_{\text{зап}}$ значения $\varphi_{\text{зап}}$, что особенно важно для выбора параметров срабатывания дистанционной защиты линии.

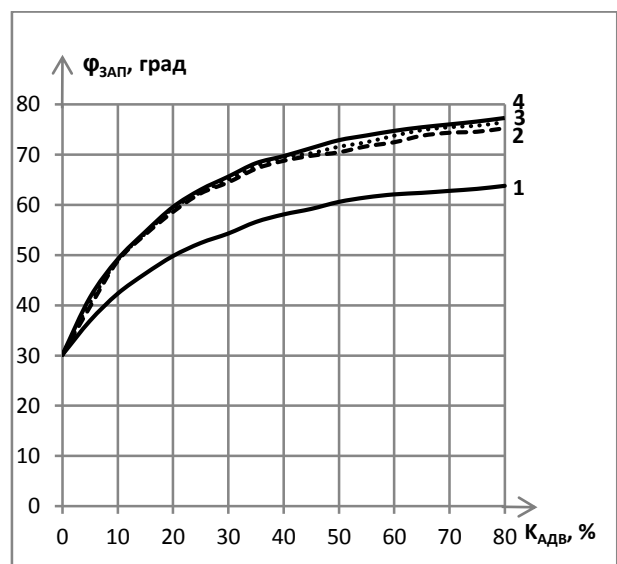


Рис. 4. Зависимость угла самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания: 1 (сплошная линия) – перерыв питания с $t_{\text{пер}} = 0,5$ с; 2 (пунктир, линия) – перерыв питания с $t_{\text{пер}} = 1,5$ с; 3 (пунктир, точка) – перерыв питания с $t_{\text{пер}} = 2,5$ с; 4 – длительный перерыв питания с полной остановкой АДВ

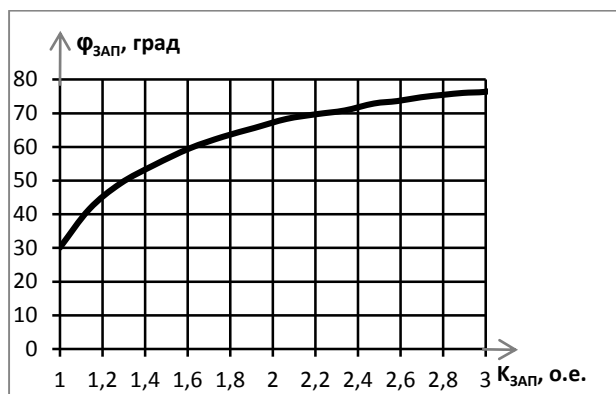


Рис. 5. Зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДВ в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДВ из неподвижного состояния

Согласно зависимости на рис. 5, при стандартном рекомендованном диапазоне коэффициента самозапуска от 1,5 до 2,0 угол самозапуска принимает значения от 55° до $\approx 70^\circ$.

Отметим, что, согласно полученным осциллограммам электрических величин, длительность процесса самозапуска при участии только группы АДВ, например при их доле в комплексной нагрузке, равной 20 %, составляет около 2,0 с.

Анализ влияния АДН на параметры $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$. Рассмотрим влияние доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки на коэффициент самозапуска и угол самозапуска.

Согласно [10], доля АДН в составе комплексной нагрузки для большинства отраслей народного хозяйства значительна и в среднем составляет более 45 %. Для отдельных отраслей промышленности доля АДН может возрастать до 75 % и более, например для пищевой и легкой промышленности.

Как отмечено в [13], в современных схемах электроснабжения АДН могут подключаться к шинным сборкам 0,4 кВ через автоматические выключатели и оставаться подключенными к питающей сети при перерывах питания. С учетом этого влияние низковольтных асинхронных двигателей на параметры режима самозапуска также необходимо рассмотреть.

Для построения зависимостей $K_{зап} = f(K_{АДН})$ и $\varphi_{зап} = f(K_{АДН})$ необходимо изменять долю АДН в составе комплексной нагрузки от 0 до 80 % с шагом 5 %. При этом в каждом опыте, аналогично опытам с АДВ, снимаем временные осциллограммы тока в месте установки защиты, $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$, токов статора, скорости вращения ротора и вращающего электромагнитного момента АДН.

На рис. 6 показана зависимость коэффициента самозапуска от доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки.

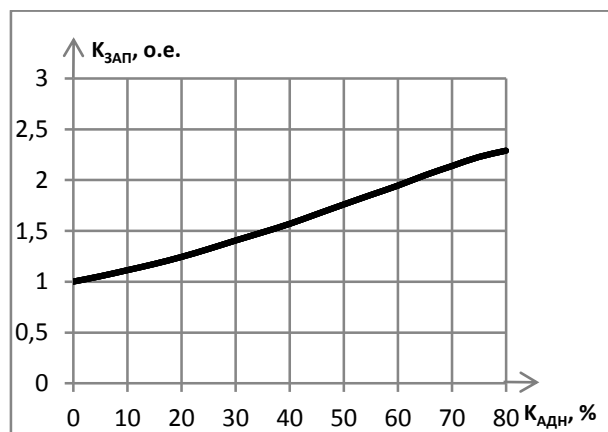


Рис. 6. Зависимость коэффициента самозапуска от доли АДН в составе комплексной нагрузки

Анализ зависимости на рис. 6 показывает, что при обычной доле АДН, равной 40–45 %, коэффициент самозапуска достигает значений выше 1,5, а при доле АДН до 60 % и более $K_{зап}$ принимает значения более 2, что выше рекомендуемого диапазона.

На рис. 7 показана зависимость угла самозапуска от доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки.

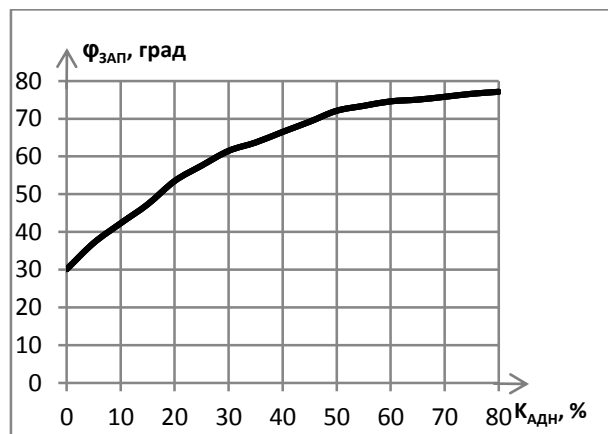


Рис. 7. Зависимость угла самозапуска от доли АДН в составе комплексной нагрузки

Согласно зависимости на рис. 7, угол самозапуска уже при обычной доле двигательной нагрузки низкого напряжения, равной 40–45 %, достигает значений $\approx 70^\circ$, что намного больше значений угла в нагрузочном режиме. При дальнейшем увеличении доли АДН для некоторых отраслей промышленности значение $\varphi_{зап}$ может достигать 75° и более.

Аналогично рассмотренному выше случаю с влиянием на параметры самозапуска АДВ, возможно построить зависимость $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$ при изменении доли АДН в составе комплексной нагрузки. Данная зависимость представлена на рис. 8.

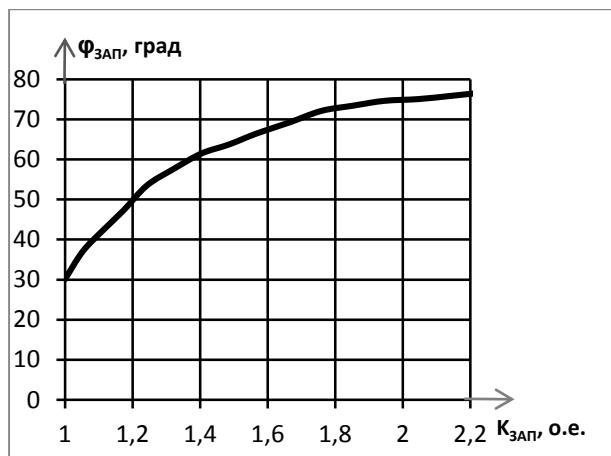


Рис. 8. Зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДН в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДН из неподвижного состояния

Анализ зависимости на рис. 8 показывает, что при стандартном рекомендованном диапазоне коэффициента самозапуска от 1,5 до 2,0 угол самозапуска принимает значения от 65° до $\approx 75^\circ$.

Отметим, что, согласно полученным осциллограммам электрических величин, длительность процесса самозапуска при участии только группы АДН, например при их доле в комплексной нагрузке, равной 40 %, составляет около 2,5 с.

Анализ совместного влияния АДВ и АДН на параметры $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$. Согласно данным [10], в составе комплексной нагрузки большинства отраслей народного хозяйства, кроме статической нагрузки, имеются как АДВ, так и АДН.

При данном исследовании доля АДН принималась равной от 0 до 70 %, фиксировалась, и с ее учетом далее варьировалась доля АДВ (от 0 до 25 %) и, соответственно, оставшаяся доля статической нагрузки.

В результате получены семейства зависимостей $K_{зап} = f(K_{АДВ})$ и $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$ при постоянной доле АДН для каждой из девяти зависимостей, представленных на рис. 9 и 10 соответственно.

Значения параметров самозапуска фиксировались в момент совместного участия АДВ и АДН в процессе самозапуска.

Анализ полученных зависимостей (рис. 9) показывает, что возможны случаи с таким сочетанием АДВ и АДН, что при их одновременном самозапуске коэффициент самозапуска будет выше рекомендуемых методиками значений даже при стандартных долях АДВ и АДН в составе комплексной нагрузки.

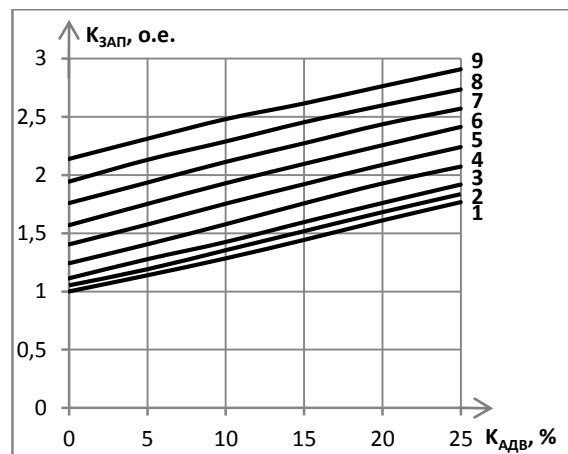


Рис. 9. Семейство зависимостей коэффициента самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при некоторой постоянной доле АДН в каждом случае: 1 – доля АДН 0 %; 2 – доля АДН 5 %; 3 – доля АДН 10 %; 4 – доля АДН 20 %; 5 – доля АДН 30 %; 6 – доля АДН 40 %; 7 – доля АДН 50 %; 8 – доля АДН 60 %; 9 – доля АДН 70 %

Анализ зависимостей на рис. 10 показывает, что в большинстве случаев угол самозапуска при совместном самозапуске АДВ и АДН имеет значение, существенно превышающее значение угла в нагрузочном режиме. При этом доля АДН в большинстве случаев не превышает обычного значения 45 %.

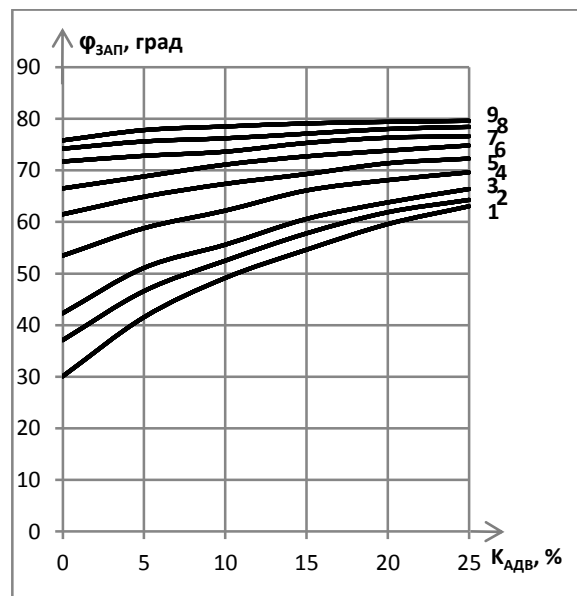


Рис. 10. Семейство зависимостей угла самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при некоторой постоянной доле АДН в каждом случае: 1 – доля АДН 0 %; 2 – доля АДН 5 %; 3 – доля АДН 10 %; 4 – доля АДН 20 %; 5 – доля АДН 30 %; 6 – доля АДН 40 %; 7 – доля АДН 50 %; 8 – доля АДН 60 %; 9 – доля АДН 70 %

Результаты. На основании проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Предложен подход для приближенного расчета параметров режима самозапуска двигательной нагрузки $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$, используемых при выборе уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП, основанный на применении данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки с делением ее на три категории: АДВ, АДН и статическая нагрузка.

2. С учетом п. 1 в программном комплексе MATLAB разработана обобщенная имитационная модель для расчетов параметров режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ двигательной нагрузки ЛЭП с односторонним питанием.

3. С использованием разработанной имитационной модели получены зависимости параметров режима самозапуска ЭД от доли АДВ и АДН в составе комплексной нагрузки ЛЭП 110–220 кВ с односторонним питанием: $K_{зап} = f(K_{АДВ})$, $K_{зап} = f(K_{АДН})$, $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$, $\varphi_{зап} = f(K_{АДН})$, а также зависимости $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$.

4. Показано, что основными факторами, влияющими на параметры режима самозапуска $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ на ЛЭП 110–220 кВ, являются доли АДВ $K_{АДВ}$, АДН $K_{АДН}$ и их соотношение в составе комплексной нагрузки.

Выводы. Предложенный подход для приближенного расчета параметров режима самозапуска ЭД может быть использован не только при отсутствии данных о составе комплексной нагрузки защищаемой ЛЭП, но и при их наличии. В последнем случае точность расчетов параметров $K_{зап}$ и $\varphi_{зап}$ повышается.

Полученные зависимости $K_{зап} = f(K_{АДВ})$, $K_{зап} = f(K_{АДН})$, $K_{зап} = f(K_{АДВ}, K_{АДН})$, $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$, $\varphi_{зап} = f(K_{АДН})$, $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ}, K_{АДН})$ и $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$ могут быть использованы для уточнения существующих методик расчета уставок резервных ступеней дистанционных защит при проектировании релейной ЛЭП 110–220 кВ и повышения на этой основе эффективности дальнего резервирования при междофазных КЗ в электрических сетях высокого напряжения.

Список литературы

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
2. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.
4. Голоднов Ю.М., Хоренян А.Х. Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергия, 1974. – 144 с.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35–330 кВ / под ред. Т.Н. Дородновой, А.А. Рудман. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 172 с.
6. Методические указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит ли-

ний электропередачи 110 кВ и выше [Электронный ресурс] / АО «СО ЕЭС». – М., 2021. – Режим доступа: https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method_distanc_protect_power_lines_281123.pdf

7. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

8. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1985. – 296 с.

9. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.

10. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98 / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 144 с.

11. Жуков В.В. Короткие замыкания в узлах комплексной нагрузки электрических систем / под ред. проф. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 224 с.

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

13. Булычев А.В., Грибков М.А. Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1(50). – С. 30–38.

References

1. Fedoseev, A.M., Fedoseev, M.A. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection of electrical power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 528 p.
2. Nagay, V.I. *Releynaya zashchita otvetvitel'nykh podstantsiy elektricheskikh setey* [Relay protection of branch substations of electrical networks]. Moscow: Energoatomizdat, 2002. 312 p.
3. Syromyatnikov, I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigatelay* [Operating modes of asynchronous and synchronous electric motors]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 528 p.
4. Golodnov, Yu.M., Khorenyan, A.Kh. *Samozapusk elektrodvigatelay* [Self-starting of electric motors]. Moscow: Energiya, 1974. 144 p.
5. Dorodnova, T.N., Rudman, A.A. (ed.) *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vypusk 7. Distsionnaya zashchita liniy 35–330 kV* [Guidelines for relay protection. Issue 7. Distance protection of 35–330 kV lines]. Moscow; Leningrad: Energiya, 1966. 172 p.
6. Metodicheskie ukazaniya po raschetu i vyboru parametrov nastroyki distantsionnykh zashchit liniy elektroperedachi 110 kV i vyshe [Guidelines for calculating and selecting parameters for setting up distance protection for power transmission lines of 110 kV and higher]. JSC SO UES. Moscow, 2021. Available at: https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method_distanc_protect_power_lines_281123.pdf
7. Ul'yanov, S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Moscow: Energiya, 1970. 520 p.
8. Shabad, M.A. *Raschety releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Leningrad: Energoatomizdat, 1985. 296 p.

9. Shabad, M.A. *Raschety releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2003. 350 p.
10. Neklepaev, B.N. (ed.) *Rukovodyaschie ukazaniya po raschyotu tokov korotkogo замыкaniya i vyboru elektrooborudovaniya: RD 153-34.0-20.527-98* [Guidelines for calculating short-circuit currents and selecting electrical equipment: RD 153-34.0-20.527-98]. Moscow: Izdatel'stvo NTs ENAS, 2006. 144 p.
11. Zhukov, V.V. *Korotkie замыкaniya v uzlakh kompleksnoy nagruzki elektricheskikh sistem* [Short circuits in complex load nodes of electrical systems]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1994. 224 p.
12. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.
13. Bulychev, A.V., Gribkov, M.A. Analiz protsessov samozapuska elektrodvigatelay v sovremennykh elektricheskikh raspredelitel'nykh setyakh s pozitsiy releynoy zashchity [Analysis of self-starting processes of electric motors in modern electrical distribution networks from the standpoint of relay protection]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2023, no. 1(50), pp. 30–38.

УДК 620.9

Станислав Олегович Хомутов

ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Барнаул, телефон (3852) 29-09-86, e-mail: khomutovso@altgtu.ru

Игорь Владимирович Белицын

ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, кандидат педагогических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Барнаул, телефон (3852) 29-07-76, e-mail: b_i_w@mail.ru

Александр Сергеевич Сабельников

ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Барнаул, e-mail: sabkvd@gmail.com

Олег Андреевич Степанов

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Тюмень, e-mail: stepanova@tyuiu.ru

Наталья Анатольевна Литвинова

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Россия, Тюмень, e-mail: litvinova2010-litvinova2010@yandex.ru

Юрий Константинович Шлык

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, e-mail: shlyk53@mail.ru

Синтез альтернатив по внедрению энергоэффективных трансформаторов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Комплексной Государственной программой Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности», утвержденной ПП РФ № 1473 от 09.10.2023 г., устанавливается цель по снижению энергоемкости ВВП РФ на 35 % к 2035 году. Программа обуславливает необходимость разработки механизмов применения товаров, объектов и технологий высокой энергетической эффективности и необходимость внедрения мер по снижению потерь электрической энергии. Самыми многочисленными являются сети 0,4–10 кВ, в этих сетях наблюдаются самые высокие технические потери, в среднем 10–15 %, при не улучшаемом уровне технических потерь в 4–5 %. Для достижения целевых показателей, снижения энергоемкости ВВП России и уменьшения потерь электрической энергии предлагается рассмотреть внедрение технологии энергоэффективных трансформаторов. Проблема заключается в том, что трансформаторы 10/0,4 кВ многочисленны, условия их работы и нагруженности различны. Стоимость таких трансформаторов на 15 % больше стоимости традиционных, это означает, что повсеместная замена приведет к значительному увеличению затрат сетевых компаний и, как следствие, к увеличению стоимости тарифа электрической энергии. Целью исследования является синтез и оценка альтернатив внедрения энергоэффективных трансформаторов для рационального выбора места установки, класса энергоэффективности и номинальной мощности при существующих ограничениях.

Материалы и методы. Для синтеза альтернатив по внедрению энергоэффективных трансформаторов использованы положения теории принятия решений, проведен анализ технической, экономической и правовой стороны вопроса, а также определены особенности и ограничения на примере территориальной сетевой организации ООО «Заринская сетевая компания». Использована оценка синтезированных альтернатив по показателям эффекта от внедрения, экономии потерь энергии, величины оплаты этих потерь и сроку окупаемости. Исходные данные и технические характеристики взяты из открытых источников, действующих государственных стандартов и стандартов организаций, а также предоставлены изготовителями. Способ расчета потерь разработан на основании методических указаний Министерства энергетики.

Результаты. Синтезированы и оценены альтернативы по внедрению энергоэффективных трансформаторов. Получены значения экономии потерь при замене классических трансформаторов на энергоэффективные, которые могут быть интерпретированы для других организаций. Получены значения экономии от оплаты сниженных потерь для сетевой организации ООО «Заринская сетевая компания». Выявлены характеристики, влияющие на эффективность внедрения энергоэффективных трансформаторов.

Выводы. Установлено, что эффективность внедрения энергоэффективных трансформаторов зависит от тарифа оплаты потерь энергии, коэффициента загрузки, величины характеристики и класса энергоэффективности, наиболее эффективным является замена трансформаторов с большим номиналом мощности и как можно большим коэффициентом загрузки. Разработка алгоритма определения таких трансформаторов позволит значительно увеличить эффект от их внедрения и сократить срок окупаемости.

Ключевые слова: энергоэффективный трансформатор, энергоэффективность, потери электрической энергии, условно-постоянные потери энергии, переменные потери энергии, коэффициент загрузки

Stanislav Olegovich Khomutov

Polzunov Altai State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of Electrical Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Barnaul, telephone (3852) 29-09-86, e-mail: khomutovso@altgtu.ru

Igor Vladimirovich Belitsyn

Polzunov Altai State Technical University, Candidate of Pedagogical Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Barnaul, telephone (3852) 29-07-76, e-mail: b_i_w@mail.ru

Aleksandr Sergeevich Sabelnikov

Polzunov Altai State Technical University, Postgraduate student of Electrical Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Barnaul, e-mail: sabkvd@gmail.com

Oleg Andreevich Stepanov

Industrial University of Tyumen, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Tyumen, e-mail: stepanova@tyuiu.ru

Natalia Anatolievna Litvinova

Industrial University of Tyumen, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Techno-sphere Safety Department, Russia, Tyumen, e-mail: litvinova2010-litvinova2010@yandex.ru

Yuri Konstantinovich Shlyk

Industrial University of Tyumen, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electrical Power Engineering Department, Russia, Tyumen, e-mail: shlyk53@mail.ru

Synthesis of alternatives for implementing energy efficient transformers

Abstract

Background. The Comprehensive State Program of the Russian Federation “Energy Saving and Improving Energy Efficiency” is approved by RF Government Resolution No. 1473 on 09.10.2023. It sets a goal to reduce the energy intensity of the GDP of the Russian Federation by 35% by 2035. The program requires the development of mechanisms of the use of goods, facilities and technologies of high energy efficiency, and the need to implement measures to reduce electricity losses. The 0,4–10 kV networks are the most numerous ones. These networks have the highest technical losses, on average 10–15 % with an unimproved level of 4–5 %. It is proposed to consider the introduction of energy efficient transformer technology to achieve the target indicators, reduce the energy intensity of Russia's GDP and electricity losses. The problem is that there are many 10/0,4 kV transformers, and their operating conditions and loads vary. The cost of such transformers is 15 % higher than traditional transformers. It means that widespread replacement will lead to a significant increase in the costs of grid companies and, thus to an increase in the cost of electricity tariffs. The purpose of this research is to synthesize and evaluate alternatives for implementing energy efficient transformers for rational selection of installation location, energy efficiency class and rated power under current limitation.

Materials and methods. To synthesize alternatives for implementation of energy-efficient transformers, the concepts of decision-making theory have been used. The authors have analyzed technical, economic and legal issues, and defined the features and limitations using a territorial network company LLC Zarinskaya Grid Company as an example. An assessment of synthesized alternatives has been used based on the indicators of effectiveness of implementation, energy loss savings, the amount of payment for these losses and the payback period. Initial data and technical specifications are taken from open sources, current state standards and standards of organizations, as well as provided by manufacturers. The method of calculation of losses has been developed based on methodical instructions of the Ministry of Energy.

Results. The alternatives for implementation of energy-efficient transformers have been synthesized and evaluated. The obtained values of loss savings when replacing classic transformers with energy-efficient ones can be interpreted for other organizations. The values of savings of the payment for reduced losses for LLC Zarinskaya Grid Company have been obtained. The characteristics that influence the efficiency of implementation of energy-efficient transformers are identified.

Conclusions. The authors have made a conclusion that the efficiency of implementation of energy-efficient transformers depends on the charge tariff of energy losses, the load factor, the value of the characteristic and energy efficiency class. The most effective way is to replace transformers with higher power ratings and the highest possible load factor. The development of an algorithm to determine such transformers will significantly increase the effectiveness of implementation and reduce the payback period.

Key words: energy efficient transformer, energy efficiency, electrical energy losses, conditional-constant energy losses, variable energy losses, load factor

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.039-045

Введение. Комплексная Государственная программа Российской Федерации (РФ) «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности», утвержденная ПП РФ № 1473 от 09.10.2023 г., устанавливает цель на снижение энергоемкости ВВП РФ на 35 % к 2035 г. Программа обуславливает необходимость разработки механизмов применения товаров, объектов и технологий высокой энергетической эффективности, а также необходимость внедрения мер по снижению потерь электрической энергии¹.

Целевые показатели по энергоэффективности обязательны для сетевых компаний, что требует внедрения дорогостоящего энергоэффективного оборудования. Рост затрат на такие технологии может привести к повышению тарифов на электроэнергию для потребителей. Для достижения целевых показателей, снижения энергоемкости ВВП России и уменьшения потерь электрической энергии предлагается рассмотреть внедрение технологии энергоэффективных трансформаторов (ЭЭТР) [1, 2, 3].

ЭЭТР представляет собой силовой трансформатор с улучшенными характеристиками потерь холостого хода и короткого замыкания². При этом ЭЭТР дороже классических силовых трансформаторов (СТР)³ [2].

За счет применения технологии ЭЭТР возможно добиться снижения технических потерь электрической энергии в распределительных сетях, что можно увидеть на примере сравнения характеристик ЭЭТР и СТР [4].

На сегодняшний день самыми многочисленными являются сети с уровнем напряжения 0,4–10 кВ, в этих сетях наблюдаются самые высокие технические потери, в среднем 10–15 %, при не улучшаемом уровне технических потерь в 4–5 %.

Проблема заключается в том, что трансформаторы 10/0,4 кВ многочисленны, условия их работы и нагруженности различны, поэтому судить об эффекте от осуществления слепой замены невозможно. Стоимость таких трансформаторов в среднем на 15 % больше стоимости традиционных, это означает, что повсеместная замена приведет к значительному увеличению затрат сетевых компаний и, как следствие, к увеличению стоимости тарифа электрической энергии.

Для получения наибольшего сбалансированного эффекта от внедрения ЭЭТР предлагается синтезировать альтернативы по внедрению ЭЭТР, которые позволят рассмотреть различные варианты внедрения, наиболее перспективные места установки ЭЭТР, где снижение потерь ощущалось

максимально. Важным моментом является определение применяемого класса энергоэффективности ЭЭТР и их номинальной мощности.

Методы исследования. Для решения задач многокритериальной оптимизации необходимо осуществить выбор наилучших альтернатив из всех возможных [5]. Синтез альтернатив осуществляется путем тщательного всестороннего анализа исследуемого явления [6, 7].

Начальный этап разработки альтернатив подразумевает создание как можно большего количества осуществимых решений. Выделяется два крайних варианта, а затем прорабатываются промежуточные решения. Одним из способов синтеза крайних альтернатив является выявление заведомо самой худшей и самой лучшей альтернативы. Данные крайние альтернативы являются границами искомых решений [8, 7].

В целях данного исследования предлагается синтезировать крайние альтернативы исходя из максимизации и минимизации затрат при замене СТР на ЭЭТР: вместо промежуточных вариантов определить гибкий вариант, который будет иметь настраиваемые параметры, с учетом определенных критериев и ограничений. Такие условия можно задать корректно в условиях конкретного предприятия. В качестве примера проведем выбор для трансформаторного парка 6–10/0,4 кВ ООО «Заринская сетевая компания» (ООО «ЗСК») [9]. Для этого выполним анализ технической, экономической и правовой сторон вопроса замены СТР на ЭЭТР, а также рассмотрим характеристики трансформаторного парка, которые выступят в качестве исходных данных для исследования [9].

Технические характеристики энергоэффективности действующих СТР имеют индекс Х1К1, характеристики ЭЭТР начинаются с индекса Х2К2 (СТО 34.01-3.2-011-2017⁴). Прочие технические характеристики трансформаторов регулируются ГОСТ Р 52719-2007.

Синтезированные альтернативы необходимо оценить, для того чтобы понять, какая из них является оптимальной. Оценивать альтернативы предлагается по следующим критериям:

1) *эффект от внедрения альтернативы в разнице потерь*, кВт·ч в год. Вычисляется по формуле

$$\Delta W_{\text{пот}} = W_{\text{СТР}} - W_{\text{ЭЭТР}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{СТР}}$ – суммарные потери холостого хода и короткого замыкания действующих силовых трансформаторов по классификации энергоэф-

¹ Постановление Правительства Российской Федерации закон от 09.09.2023 № 1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации “Энергосбережение и повышение энергетической эффективности”».

² Постановление Правительства РФ от 17.06.2015 N 600 (ред. от 08.02.2022) «Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности».

³ Коммерческое предложение на поставку энергоэффективных трансформаторов: [док. внутреннего пользования]; ОАО «Алтарнс». – Барнаул, 2023. – 1 с.

⁴ СТО 34.01-3.2-011-2017 Трансформаторы силовые распределительные 6–10 кВ мощностью 63–2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания.

фективности $X1K1$, кВт·ч в год; $W_{ЭЭТР}$ – суммарные потери холостого хода и короткого замыкания ЭЭТР по классификации энергоэффективности $X2K1$, кВт·ч в год;

2) *эффект от внедрения альтернативы в разнице оплаты потерь*, тыс. руб. в год, для конкретной ТСО. Вычисляется по формуле

$$\Delta_{\text{ПОТ}} = W_{\text{СТР}} \text{ СТ}_{\text{ПОТ}} - W_{\text{ЭЭТР}} \text{ СТ}_{\text{ПОТ}}, \quad (2)$$

где $\text{СТ}_{\text{ПОТ}}$ – стоимость оплаты потерь одного кВт·ч для исследуемой ТСО с НДС 20 %, тыс. руб.;

3) *срок окупаемости альтернативы* для рассматриваемой ТСО. Вычисляется по формуле

$$T_{\text{ОК}} = \frac{I}{\Delta_{\text{ПОТ}}}, \quad (3)$$

где I – величина инвестиций на реализацию альтернативы, тыс. руб.

Расчет годовых потерь, кВт·ч в год, в силовые трансформаторы производится по формуле

$$W_{\text{СТР}} = \sum N_i (W_{X_i} + W_{K3_i}), \quad (4)$$

где i – номинальная мощность трансформатора; N_i – общее количество СТР или ЭЭТР i -го уровня номинальной мощности; W_{X_i} – годовые условно-постоянные потери с характеристиками энергоэффективности $X1K1$ или $X2K2$ i -го уровня номинальной мощности; W_{K3_i} – годовые потери короткого замыкания с характеристиками энергоэффективности $X1K1$ или $X2K2$ i -го уровня номинальной мощности.

Расчет годовых условно-постоянных потерь энергии, кВт·ч в год, для двухобмоточного трансформатора с i -й номинальной мощностью не представляет труда и производится по формуле

$$W_X = \Delta P_X T_p \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2, \quad (5)$$

где ΔP_X – паспортные данные потерь мощности холостого хода; T_p – число часов работы в год; U – напряжение на высшей стороне трансформатора, кВ; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение высшей обмотки трансформатора, кВ.

Расчет нагрузочных потерь представляет некоторую сложность. Эти потери могут быть рассчитаны несколькими способами, в зависимости от наличия исходной информации⁵:

- 1) методом оперативных расчетов;
- 2) методом расчетных суток;
- 3) методом средних нагрузок;
- 4) методом числа часов наибольших потерь мощности;
- 5) методом оценки потерь по обобщенной информации о схемах и нагрузке сети.

Для расчета нагрузочных потерь электроэнергии в каждом элементе сетей могут приме-

няться методы 1 и 3, в зависимости от информационной обеспеченности, причем метод 1 считается более точным, но предъявляет более строгие требования к исходным данным на заданном промежутке времени, которые могут быть получены путем прямых непрерывных измерений. Трансформаторы 6–10 кВ несут массовый характер применения, в связи с чем метод 1 применить чрезвычайно трудозатратно.

Для метода 3 достаточно паспортных данных исследуемого оборудования и данных о расходе электроэнергии за базовый период. Так как данные о расходе электроэнергии отсутствуют, а переменные потери представляют собой нагрев проводника под действием электрического тока по закону Джоуля–Ленца, то переменные потери будут зависеть от квадрата тока и сопротивления проводника. Зная, что потеря мощности короткого замыкания ΔP_{K3} показывает потери мощности при 100 %-ной загрузке трансформатора, положим, что значения коэффициента загрузки $K_{\text{згр}} \in K = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$. Тогда формула расчета переменных потерь в трансформаторе, кВт·ч в год, может принять вид

$$W_{K3} = \Delta P_{K3} T_p K_{\text{згр}}, \quad (6)$$

где ΔP_{K3} – паспортные данные потерь мощности короткого замыкания; T_p – число часов работы в год; $K_{\text{згр}}$ – коэффициент загрузки.

Результаты исследования. Определим крайние альтернативы с позиции максимальных и минимальных затрат на инвестиционные вложения.

Альтернативу, подразумевающую максимальные инвестиционные вложения, назовем I, ее суть заключается в замене всех имеющихся СТР ООО «ЗСК» классом напряжения 10 кВ номинальной мощностью 100, 160, 250, 400, 630 и 1000 кВА на ЭЭТР. Замена прочих номинальных мощностей представляется нецелесообразной для исследования ввиду малочисленности и отсутствия данных о стоимости таких ЭЭТР. Всего трансформаторный парк ТСО насчитывает 816 единиц таких СТР с выбранными характеристиками. Из них 194 трансформатора установлены на двухтрансформаторных подстанциях 10 кВ. В нормальном режиме все без исключения двухтрансформаторные подстанции конкретной ТСО работают в режиме разделенной нагрузки, у каждого трансформатора нагрузка индивидуальная. При отказе одного из трансформаторов его замена производится в течение одних суток. Так как подавляющее время двухтрансформаторные подстанции работают в нормальном режиме с разделенной нагрузкой, то в целях данного исследования условимся считать такие трансформаторы единичными и независимыми друг от друга.

⁵ Приложение № 1 к инструкции по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям «Методика расчета технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в базовом периоде».

Альтернатива I заведомо позволит выявить максимальный эффект от внедрения, наглядно покажет, насколько сократятся потери в трансформаторах и на какую неулучшаемую экономию затрат по оплате технологических потерь можно рассчитывать. Одновременно

данное решение покажет максимальные затраты на капиталовложения.

Оценка альтернативы I приведена в табл. 1 и рассчитана с использованием формул (1)–(6), при этом $k_{згр} = 0,5$.

Таблица 1. Исходные данные технико-экономических показателей сетевой организации и результаты оценки альтернативы I

№ п/п	Номинальная мощность, кВА	Количество, ед.	$\Delta W_{потI}$, кВт·ч в год	$\mathcal{E}_{потI}$, тыс. руб. в год	Инвестиции на ЭЭТР, тыс. руб.
1	100	144	154 841	768,12	28 195,92
2	160	140	225 044	1 108,03	38 074,40
3	250	172	344 662	1 711,94	54 296,96
4	400	209	676 495	3 320,7	92 248,42
5	630	127	661 949	3 216,96	67 741,80
6	1000	24	185 379	901,56	20 604,12
Всего		816	2 248 372	11 027,31	301 161,62

Срок окупаемости для альтернативы I составит $T_{окI} = 27$ лет.

Следующую альтернативу следует рассмотреть как минимальные инвестиционные вложения, не заменять СТР на ЭЭТР вовсе. Расчет данного варианта покажет максимальный ущерб от отплаты технических потерь и наибольшую величину потерь. Назовем вариант полного отказа от применения ЭЭТР альтернатива III. За расчетный период исследования был взят срок окупаемости $T_{окI} = 27$ лет, тогда $\Delta W_{потIII} = 60\,706\,051$ кВт·ч. За исследуемый промежуток времени придется понести затраты в размере $\mathcal{E}_{потIII} = 301$ млн руб., что равно полным затратам на инвестиции по приобретению ЭЭТР.

Рассчитанная оценка альтернативы III показывает максимальный убыток, который будет получен при отказе от применения ЭЭТР.

Теперь, когда границы определены, синтезируем промежуточную альтернативу II. Ввиду статуса ТСО, предприятию каждый год необходимо вводить новые объекты электросетевого хозяйства в рамках технологического присоединения, кроме того, производить замену неподлежащих капитальному ремонту трансформаторов после технологических нарушений. За период 5 лет (по 2022 год включительно) таких обязательных замен произведено, в среднем, по

10 единиц в год. Если такие трансформаторы соответствуют критериям по мощности и коэффициенту загрузки, применяемым в данном исследовании, то целесообразно рассмотреть замену на предлагаемые ЭЭТР.

Если подлежащие замене или вводимые вновь трансформаторы не соответствуют данным критериям, имеет смысл рассмотреть их замену на предлагаемые ЭЭТР.

В рассматриваемом парке организации не соответствующие критериям подлежащие замене или вводимые вновь трансформаторы практически отсутствуют. Их вклад в данное исследование оценивается как незначительный, и поэтому они не будут браться в расчет. Но при более обширном трансформаторном парке необходимо учитывать это обстоятельство.

Финансирование инвестиционных вложений можно осуществить за счет инвестиционной программы, пусть эти средства выступают как ограничения. Тогда необходимо определить такую комбинацию замены СТР на ЭЭТР, чтобы иметь максимальный эффект от внедрения.

Для этого были построены графики зависимости срока окупаемости и экономии потерь от коэффициента загрузки для различных номинальных мощностей ЭЭТР (рис. 1, 2).

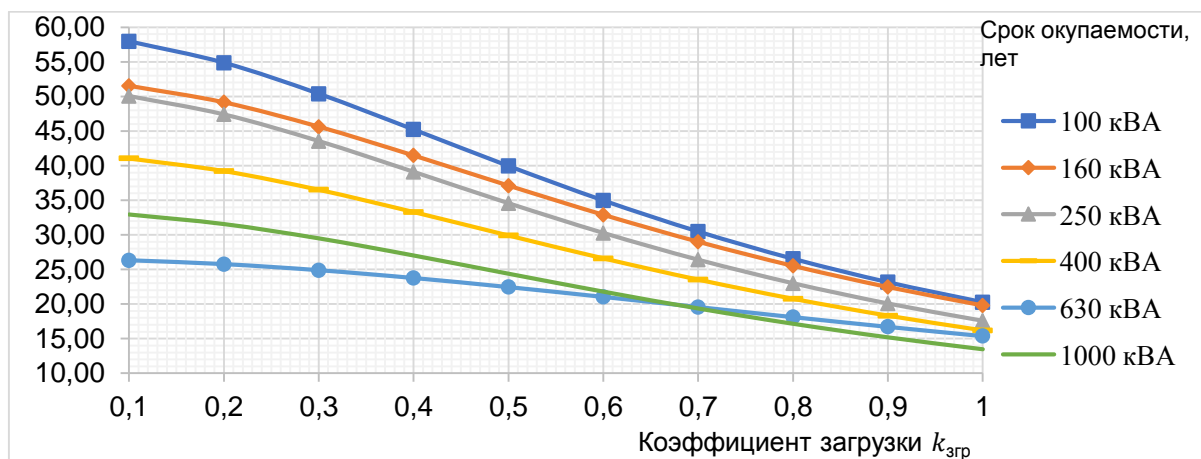


Рис. 1. График зависимости срока окупаемости от коэффициента загрузки

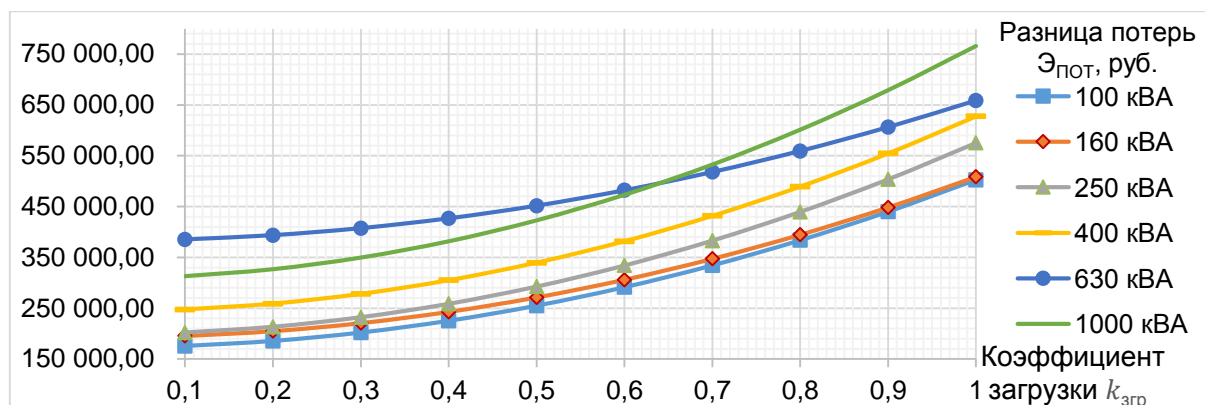


Рис. 2. График зависимости экономии потерь от коэффициента загрузки

Анализ графиков на рис. 1, 2 показал, что чем выше номинальная мощность ЭЭТР с характеристиками энергоэффективности X2K2 и чем выше коэффициент загрузки, тем больше экономия потерь от применения ЭЭТР и быстрее срок окупаемости.

Так, было выявлено, что при замене на ЭЭТР с коэффициентом загрузки в 100 % возможно добиться срока окупаемости в 12,5 лет. Причем при коэффициенте загрузки менее 67 % самым окупаемым будет являться трансформатор номинальной мощностью 630 кВА.

Планирование и бюджетирование сетевых организаций подразумевает пятилетние этапы. В связи с этим был проведен расчет замены всех СТР 630 кВА, срок службы которых превысил 25 лет (104 единицы). С учетом пятилетнего плана была запланирована замена по 21 трансформатору в год. Результаты оценки при выполнении альтернативы II в разрезе одного года и пятилетнего плана приведены в табл. 2.

При реализации альтернативы II срок окупаемости будет сокращен с 27 лет до $T_{окII} = 22$ года при $k_{згр} = 0,5$. При применении специального ал-

горитма для отыскания СТР с более высокой загрузкой можно добиться еще большего эффекта от внедрения ЭЭТР.

Выводы. Предложенный вариант синтеза альтернатив для внедрения энергоэффективных трансформаторов, а также способ оценки этих альтернатив с помощью расчета показателей эффекта от внедрения ЭЭТР позволили выявить самую эффективную альтернативу.

Самой эффективной является замена трансформаторов напряжением 10 кВ с большими номиналами 630–1000 кВА и высоким коэффициентом загрузки, что особенно актуально для единичных трансформаторов, работающих на выделенную нагрузку.

Разработка алгоритма для определения таких трансформаторов позволит значительно повысить эффективность внедрения и сократить сроки окупаемости. В этих же целях необходимо рассмотреть влияние манипуляции коэффициентом загрузки на эффективность замены СТР на ЭЭТР. Кроме того, эффективность внедрения энергоэффективных трансформаторов зависит от тарифа оплаты потерь энергии, коэффициента загрузки, величины характеристики и класса энергоэффективности.

Таблица 2. Данные для оценки альтернативы II

Наименование показателя	Единицы измерения	Первый год	По прошествии 5 лет
Потери энергии	кВт*ч	519,69	2 573 688
Оплата для СТР X1K1	тыс. руб.	2 369,77	11 736 017
Потери при применении энергоэффективных трансформаторов	кВт*ч руб.	410,23 1 870,65	2 031 619 9 264 183
Инвестиции на ЭЭТР X2K2	тыс. руб.	11 201,40	55 473 600
Эффект от внедрения ЭЭТР	кВт*ч тыс. руб.	109,46 499,12	542 068 2 471 833

Список литературы

1. Сабельников А.С. Перспективы снижения потерь электроэнергии за счет оптимизации выбора энергоэффективных трансформаторов // ЭНЕРГО-СТАРТ: материалы VI Междунар. молодежной науч.-практ. конф. в рамках Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации, Кемерово, 17–22 ноября 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный

технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 230-1. – EDN JOVRDA.

2. Дроздов Н.В., Ларин В.С., Филиппов А.Е. К вопросу энергоэффективности распределительных трансформаторов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 4. – С. 41–46. – EDN UGCKTR.

3. Дроздов Н.В., Ларин В.С., Филиппов А.Е. О нормировании потерь и энергоэффективности распре-

делительных трансформаторов // Энергетик. – 2018. – № 3. – С. 13–17. – EDN YUJLAB.

4. **Белей В.Ф.** Анализ современного состояния и тенденций развития распределительных трансформаторов // Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2013: труды XI Междунар. науч. конф., Калининград, 25–27 сентября 2013 г. Ч. 1. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2013. – С. 373–376. – EDN ZEEWAJ.

5. **Вотякова Е.М., Гнатюк Б.А., Староверов Б.А.** Многокритериальный выбор высоковольтного выключателя для электрической подстанции на основе применения прямого метода анализа иерархии // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 70–75. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.070-075. – EDN WVOUJD.

6. **Колибаба О.Б., Козлова М.В., Гаряев А.Б.** Разработка критериев оценки эффективности методов обращения с твердыми коммунальными отходами // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 3. – С. 20–28. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.020-028. – EDN MPICEJ.

7. **Soumik D., Bipradas B., Balaram D.** A DE Novo multi criteria heterogeneous group decision making approach for green performance assessment of CNC machine tools // *Decision Science Letters*. – 2024. – Vol. 2, No. 13. – P. 499–524. DOI: 10.5267/j.dsl.2023.12.007.

8. **Воробьев П.В.** Менеджмент: учеб. пособие. – Тольятти: ВЭГУ, 2009. – С. 225.

9. **Сабельников А.С., Зимина Л.А.** Внедрение энергоэффективных трансформаторов на примере крупнейших электросетевых компаний Алтайского края // Наука и молодежь: материалы XX Всероссий. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Барнаул, 17–21 апреля 2023 г. Т. 1. Ч. 1. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. – С. 407–408. – EDN YABPOA.

References

1. **Sabel'nikov, A.S.** Perspektivy snizhenie poter' elektroenergii za schet optimizatsii vybora energoeffektivnykh transformatorov [Prospects for reducing electricity losses through optimization of energy-efficient transformer selection]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «ENERGOSTART» v ramkakh Desyatiletia nauki i tekhnologii v Rossiyskoy Federatsii, Kemerovo, 17–22 noyabrya 2023 g.* [ENERGO-START: materials of the VI International youth scientific-practical conference within the framework of the Decade of science and technology in the Russian Federation]. Kemerovo: Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. T.F. Gorbacheva, 2023, pp. 230–1. EDN JOVRDA.

2. **Drozdoz, N.V., Larin, V.S., Filippov, A.E.** K voprosu energoeffektivnosti raspredelitel'nykh transformatorov [On the issue of energy efficiency of distribution

transformers]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2015, no. 4, pp. 41–46. EDN UGCKTR.

3. **Drozdoz, N.V., Larin, V.S., Filippov, A.E.** O normirovaniy poter' i energoeffektivnosti raspredelitel'nykh transformatorov [On standardization of losses and energy efficiency of distribution transformers]. *Energetik*, 2018, no. 3, pp. 13–17. EDN YUJLAB.

4. **Beley, V.F.** Analiz sovremennogo sostoyaniya i tendentsiy razvitiya raspredelitel'nykh transformatorov [Analysis of current state and development trends of distribution transformers]. *Trudy XI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Innovatsii v nauke, obrazovanii i biznese – 2013»*, Kaliningrad, 25–27 sentyabrya 2013 g. Ch. 1 [Proceedings of the XI International scientific conference “Innovations in science, education and business – 2013”]. Kaliningrad: Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2013, pp. 373–376. EDN ZEEWAJ.

5. **Votyakova, E.M., Gnatyuk, B.A., Staroverov, B.A.** Mnogokriterial'nyy izbor vysokovol'tnogo vyklyuchatelya dlya elektricheskoy podstantsii na osnove primeneniya pryamogo metoda analiza ierarkhii [Multicriteria selection of high-voltage circuit breaker for an electrical substation based on direct application of analytic hierarchy process method]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 70–75. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.070-075. EDN WVOUJD.

6. **Kolibaba, O.B., Kozlova, M.V., Garyaev, A.B.** Razrabotka kriteriev otsenki effektivnosti metodov obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami [Development of criteria for assessing the effectiveness of methods for handling municipal solid waste]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 3, pp. 20–28. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.020-028. EDN MPICEJ.

7. **Soumik, D., Bipradas, B., Balaram, D.** A DE Novo multi criteria heterogeneous group decision making approach for green performance assessment of CNC machine tools. *Decision Science Letters*, 2024, vol. 2, no. 13, pp. 499–524. DOI: 10.5267/j.dsl.2023.12.007.

8. **Vorob'ev, P.V.** *Menedzhment* [Management]. Tol'yatti: VEGU, 2009, p. 225.

9. **Sabel'nikov, A.S., Zimina, L.A.** Vnedrenie energoeffektivnykh transformatorov na primere krupneyshikh elektrosetevykh kompaniy Altayskogo kraia [Implementation of energy-efficient transformers using the example of major power grid companies in altai region]. *Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Nauka i molodezh'»*, Barnaul, 17–21 aprelya 2023 g. T. 1. Ch. 1 [Science and youth: proceedings of the XX All-Russia scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists]. Barnaul: Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova, 2023, pp. 407–408. EDN YABPOA.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333, 621.314.26

Михаил Алексеевич Захаров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, e-mail: mazoid@gmail.com

Александр Станиславович Страхов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: astrakhov90@yandex.ru

Евгений Михайлович Новоселов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Денис Андреевич Полкошников

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: pda37@yandex.ru

Илья Николаевич Сулыненков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: sulynenkov.in@ispu.ru

Андрей Александрович Скоробогатов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Применение преобразователя частоты для диагностики асинхронных двигателей методом спектрального анализа тока статора

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время одним из наиболее перспективных методов контроля повреждений обмоток роторов асинхронных двигателей является метод спектрального анализа тока статора в установившемся и пусковом режимах работы. Однако практически все подобные исследования проведены без учета преобразователей частоты, которые часто используются в составе приводов. Преобразователи частоты могут использоваться для увеличения продолжительности пуска асинхронного двигателя и изменения величины напряжения и частоты, что позволяет добиться более достоверных результатов диагностики. В связи с этим актуальным

является исследование возможностей применения преобразователя частоты для контроля состояния обмоток ротора двигателей по току статора.

Материалы и методы. Для проведения исследований разработан экспериментальный стенд. Исследования проведены на асинхронном двигателе типа АИР71А6 при исправной обмотке ротора и наличии одного оборванного стержня, в качестве силового преобразователя использован преобразователь частоты Веспер Е4-8400-010Н. Для регистрации тока статора с трансформаторов тока использовано устройство ENMU. Обработка сигналов тока статора осуществлена с помощью оконного преобразования Фурье с использованием оконной функции Флэттоп.

Результаты. Получены и проанализированы частотно-временные спектры сигналов тока статора при наличии и отсутствии обрыва стержня обмотки ротора асинхронного двигателя. Преобразователь частоты использован для увеличения продолжительности пуска и изменения режимных параметров в процессе работы двигателя. Обнаружена характерная для повреждения гармоническая составляющая при наличии обрыва, что подтверждает возможность применения преобразователя для диагностики двигателей.

Выводы. Показано, что преобразователям частоты в процессе диагностики нужно уделять внимание не только как возможному источнику помех и искажения диагностической информации, но и как инструменту для получения более достоверных результатов о состоянии обмоток роторов асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, спектральный анализ, оконное преобразование Фурье, ток статора, обрыв стержней ротора

Mikhail Alekseevich Zakharov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mazoid@gmail.com

Alexander Stanislavovich Strakhov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: astrakhov90@yandex.ru

Evgeniy Mikhailovich Novoselov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Denis Andreevich Polkoshnikov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electrical Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: pda37@yandex.ru

Ilya Nikolaevich Sulynenkov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sulynenkov.in@ispu.ru

Andrey Aleksandrovich Skorobogatov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electric Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aas-kor.andrey@yandex.ru

Application of frequency converter to examine induction motors using spectral analysis method of stator current

Abstract

Background. Currently, one of the most promising methods to monitor damage of the rotor windings of induction motors is the method of spectral analysis of the stator current in steady-state and starting modes of operation. However, almost all such studies have been conducted without considering frequency converters, which are commonly used in drive systems. Frequency converters can be used to increase the starting time of an induction motor and change the voltage and frequency values, which will allow achieving more reliable diagnostic results. Therefore, it is relevant to study the possibilities to use a frequency converter to monitor the condition of the rotor windings of motors based on the stator current.

Materials and methods. A test bench has been developed for the research. The study has been conducted based on an induction motor of the AIR71A6 type with a fault-free rotor winding and one broken rod. A Vesper E4-8400-010H frequency converter has been used as a power converter. The ENMU device has been used to record the stator current from the current transformers. The stator current signals have been processed using the short-time Fourier transform with the Flat-top window function.

Results. The frequency-time spectra of the stator current signals have been obtained and analyzed with and without a breakage in the rotor winding rod of the induction motor. The frequency converter has been used to increase the start-up duration and change the operating parameters during the motor operation. A harmonic component characteristic of damage has been detected in case of a break, which confirms the possibility to use the converter for motor diagnostics.

Conclusions. The results of the research have shown that in diagnostic process frequency converters are not only a possible source of interference and distortion of diagnostic information, but also a tool to obtain more reliable results on the condition of the rotor windings of induction motors.

Key words: induction motor, frequency converter, spectral analysis, short-time Fourier transform, stator current, rotor bar breakage

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.046-060

Состояние вопроса. Хорошо известно, что в настоящее время асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутыми обмотками роторов активно применяются в различных областях промышленности в качестве приводов механизмов. В случае отказа АД может потребоваться его дорогостоящий ремонт. Также отказы ответственных двигателей могут привести к нарушению технологического процесса на предприятии. По этой причине одной из задач современной электроэнергетики является разработка новых и совершенствование существующих методов диагностирования АД для своевременного обнаружения неисправностей.

Одной из распространенных причин отказов АД является обрыв стержней короткозамкнутых обмоток роторов. В соответствии с [1, 2], доля отказов, связанных с повреждениями обмоток роторов, составляет около 10 % от общего числа отказов. Одним из наиболее перспективных методов для выявления обрывов стержней обмотки ротора АД является спектральный анализ сигналов. При этом наиболее часто в работах предлагается использовать сигнал тока статора, так как в настоящее время он является одним из наиболее удобных и доступных для регистрации в процессе эксплуатации, а также несет в себе большое количество диагностической информации о состоянии двигателя. Идея метода заключается в том, что при возникновении повреждения обмотки ротора в спектрах диагностических сигналов проявляется ряд гармонических составляющих, которые практически не видны при отсутствии повреждений. Данные гармоники принято называть гармониками от фиктивной обмотки ротора. Однако в сигнале тока статора из этих гармоник в спектрах отчетливо проявляется только гармоника от фиктивной обмотки ротора порядка, совпадающего с числом пар полюсов p , на нижней боковой частоте [3] (далее для краткости будем называть ее гармоникой ФОР). Значение частоты гармоники ФОР в сигнале тока статора в любой момент времени t может быть определено по выражению

$$f_{\text{ФОР}}^p(t) = |f_c(1 - 2 \cdot s(t))|, \quad (1)$$

где f_c – частота сети, Гц; $s(t)$ – скольжение двигателя в момент времени t .

На данный момент эти методы достаточно хорошо изучены, имеется большое количество публикаций по обнаружению обрывов стержней АД как в пусковом (например, в [3, 4]), так и в

установившемся режимах работы (например, в [5–7]) на основе спектрального анализа тока статора. Однако обычно в работах не учитывается тот факт, что в настоящее время все чаще в составе приводов применяются преобразователи частоты (ПЧ) с двойным преобразованием энергии, построенные на базе транзисторов и тиристорных, служащих для регулирования частоты вращения двигателей и создания условий для плавного пуска.

На сегодняшний день существует небольшое количество публикаций, посвященных вопросам влияния ПЧ на результаты диагностики АД. Можно выделить работы [8–11], где описываются особенности проведения контроля АД с ПЧ на основе метода спектрального анализа тока статора при плавном нарастании частоты, [12], где авторами предлагается производить анализ огибающей сигнала тока статора в целях диагностики АД с ПЧ, а также [13] доказано отсутствие существенного влияния ПЧ на результаты диагностики по внутреннему магнитному полю.

Однако при этом не уделяется внимания вопросам непосредственного применения самого ПЧ в качестве инструмента для обеспечения возможности проведения контроля на основе анализа спектра тока статора и увеличения достоверности получаемых результатов. В [14] предлагается подобная идея, но подходящая лишь для АД мощностью до 30 кВт и при иных видах повреждений. При этом именно в целях анализа спектра применение ПЧ имеет несколько неоспоримых преимуществ:

1) возможность изменения частоты и действующего значения питающего напряжения при пуске и функционировании АД;

2) возможность обеспечения плавного пуска АД в течение продолжительного времени.

Таким образом, целью настоящего исследования является описание возможностей применения ПЧ для обнаружения повреждений обмоток роторов АД на основе метода спектрального анализа тока статора и экспериментальное их подтверждение.

Материалы и методы. При проведении контроля методом спектрального анализа тока статора возникают следующие основные проблемы:

1) в установившемся режиме работы разница частот между основной гармоникой сигнала (f_c в выражении (1)) и значением частоты гармоники ФОР ($f_{\text{ФОР}}^p$), составляет $2 \cdot s \cdot f_c$. Хорошо известно, что при номинальном напряжении

величина скольжения будет близка к 0, поэтому две указанные гармоники будут располагаться в спектре очень близко друг к другу (будут иметь очень близкие частоты), что значительно усложняет процесс контроля. При этом чем ниже нагрузка двигателя, тем меньше будет значение скольжения и амплитуды гармоники ФОР, поэтому необходимо достаточно большое время регистрации сигнала, чтобы можно было выявить в спектре данную гармонику, и принятие мер для снижения последствий эффекта растекания спектра [15];

2) в пусковом режиме скольжение изменяется от 1 до 0, поэтому искомую гармонику обнаружить значительно проще, однако для АД малой мощности время пуска очень мало. В [3] показано, что для возможности проведения контроля в режиме пуска его длительность должна составлять не менее 0,8 с, что часто не выполняется.

Исходя из сказанного выше, рассмотрим три способа применения преобразователя частоты:

– во-первых, изменение значения частоты и питающего напряжения в процессе эксплуатации. Идея заключается в том, что при снижении питающего напряжения будет снижаться также и вращающий момент АД, поэтому и значение скольжения будет возрастать, вследствие чего увеличится разница частот между основной гармоникой сигнала и гармоникой ФОР, что позволит легко обнаружить гармонику ФОР в спектре и более точно определить ее амплитуду;

– во-вторых, осуществление пуска на пониженном напряжении. Как уже было сказано, снижение напряжения приведет к снижению вращающего момента АД, вследствие чего можно значительно увеличить продолжительность пуска, при этом частота в течение пуска изменяться не будет;

– в-третьих, имеется возможность обеспечения плавного пуска, когда в процессе пуска будет изменяться не только действующее значение питающего напряжения, но и значение частоты от 0 до 50 Гц, при этом время подъема частоты также можно регулировать.

Для доказательства возможности применения ПЧ указанным образом были проведены исследования на экспериментальном стенде, фотография и более детальное описание которого приведены в [13]. Эксперименты проводились на низковольтном АД типа АИР 71А6 (1) мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов при использовании двух различных роторов – один с исправной обмоткой, второй с одним оборванным (высверленным) стержнем. В качестве преобразователя частоты был использован Веспер Е4-8400-010Н. Регистрация сигнала тока статора осуществлялась с помощью устройства сопряжения с шиной процесса ENMU, которое подключалось к измерительным цепям трансформаторов тока типа ЕКФ ТТЕ-А-10/5. Для преобразования среды

распространения сигнала был использован медиаконвертер. Запись производилась на ноутбук с дальнейшей обработкой сигналов в программном комплексе Matlab на основе оконного преобразования Фурье. Для более достоверного определения амплитуд и снижения эффекта растекания спектра в качестве оконной функции использовано окно Флэттоп.

Было запланировано два опыта, для которых характеристика $U(f)$, настроенная в преобразователе частоты, представлена на рис. 1. Анализ этой характеристики показывает, что при установке значения частоты 49 Гц напряжение, подаваемое на АД, будет равно 33 В, а увеличение частоты до 50 Гц приведет к возрастанию напряжения до номинальной величины 380 В. Это сделано для возможности регулирования величины напряжения практически без изменения частоты.

В ходе первого опыта изменение частоты в переходных режимах производилось практически мгновенно.

Порядок проведения опыта №1:

- 1) пуск АД на пониженном напряжении (частота 49 Гц, напряжение 33 В);
- 2) работа АД в установившемся режиме с частотой 49 Гц и напряжением 33 В около 10 с;
- 3) подъем частоты до 50 Гц и напряжения до 380 В;
- 4) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение 10 с;
- 5) снижение частоты до 49 Гц и напряжения до 33 В;
- 6) работа АД в установившемся режиме с частотой 49 Гц и напряжением 33 В в течение 10 с;
- 7) подъем частоты до 50 Гц и напряжения до 380 В;
- 8) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение 10 с;
- 9) отключение преобразователя (снижение частоты и напряжения до 0).

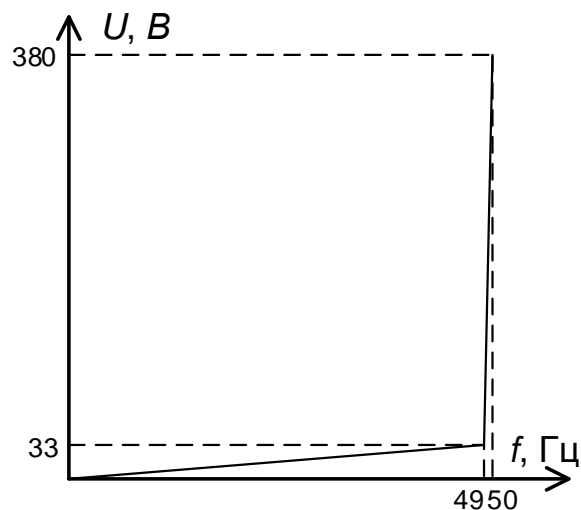


Рис. 1. Зависимость $U(f)$, выставленная в преобразователе частоты

В ходе второго опыта осуществлялось плавное изменение частоты (изменение частоты от 0 до 50 Гц в течение 10 с). При этом частота изменялась плавно не только при пуске АД, но и при изменении режима работы. Идея опыта заключалась в изучении возможности применения для диагностики пуска АД от ПЧ с плавным нарастанием частоты.

Порядок проведения опыта №2:

- 1) пуск с плавным увеличением частоты от 0 до 50 Гц в течение 30 с (напряжение изменялось в соответствии с приведенной на рис. 1 характеристикой);
- 2) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение 10 с;
- 3) плавное снижение частоты с 50 до 30 Гц;
- 4) работа АД в установившемся режиме с частотой 30 Гц и напряжением 20 В в течение 10 с;

- 5) плавное увеличение частоты с 30 до 50 Гц;
- 6) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение около 10 с;

- 7) плавное снижение частоты преобразователем от 50 до 0 Гц.

Оба эксперимента выполнены для ненагруженного АД.

Результаты. Рассмотрим результаты проведенных экспериментов. Полные частотно-временные спектры (ЧВС) зарегистрированных сигналов с исправного АД и АД с одним оборванным стержнем обмотки ротора в ходе опыта №1 приведены на рис. 2, а более детальное представление ЧВС в различных режимах – на рис. 3–5. Графики изменения тока статора от времени в ходе эксперимента приведены на рис. 6.

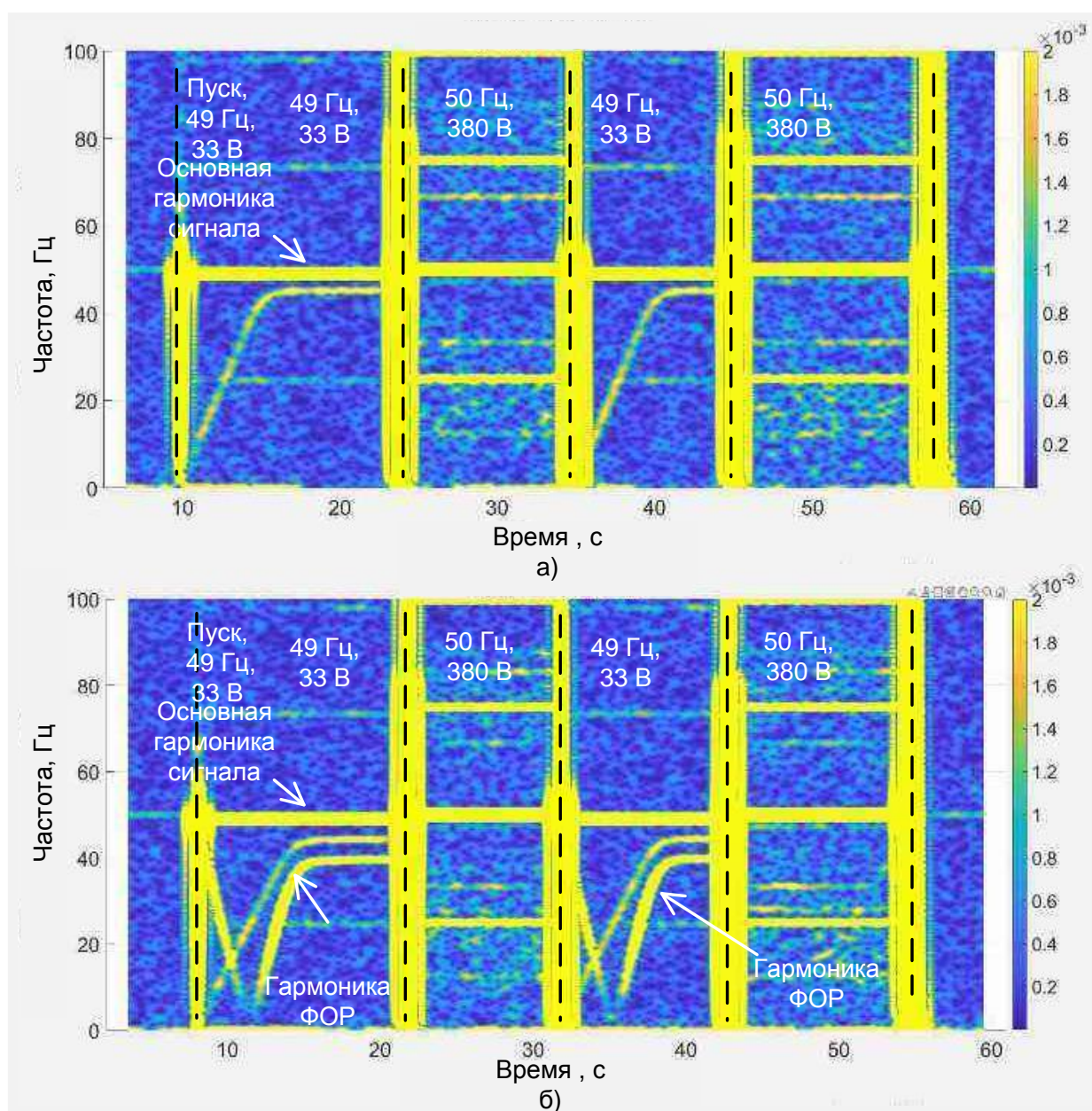


Рис. 2. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

Анализ ЧВС сигналов в режиме пуска (рис. 3) показывает, что при подаче напряжения 33 В время пуска АД увеличивается приблизительно до 5 с, что позволяет произвести обработку пускового тока статора с помощью оконного преобразования Фурье. Также очевидно, что при наличии повреждения обмотки ротора (рис. 3,б) в спектре отчетливо проявляется

гармоника ФОР, особенностью которой является отражение от оси времени в процессе пуска, в то время как для исправного АД (рис. 3,а) эта гармоника отсутствует. Данный факт подтверждает возможность обнаружения обрыва в пусковом режиме даже при пониженном напряжении с помощью ПЧ.

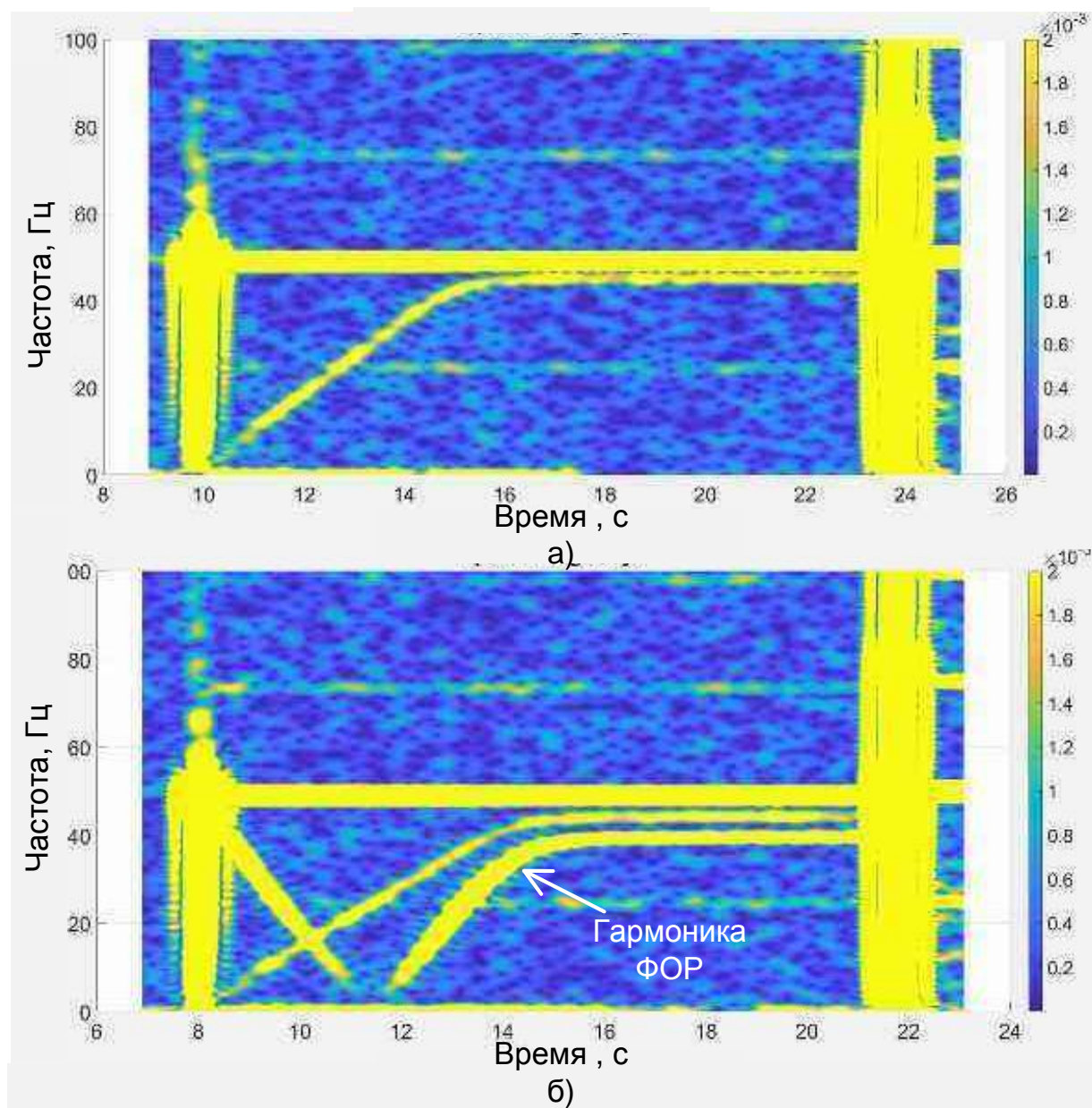


Рис. 3. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1 – участок пуска АД на пониженном напряжении: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

На рис. 4 приведены ЧВС для установившегося режима с частотой 50 Гц и напряжением 380 В. Их анализ показывает, что получаемые спектры практически идентичны друг другу и не позволяют выявить повреждение обмотки ротора, поскольку скольжение АД в этом режиме составляет 0,001, поэтому гармоника ФОР перекрывается в спектре основной гармоникой сигнала.

На рис. 5 приведены ЧВС для переходного режима при снижении частоты с 50 до 49 Гц, а также для установившегося режима работы с частотой 49 Гц и напряжением 33 В. На этих спектрах можно отчетливо увидеть появление гармоники ФОР как в процессе изменения частоты, так и в установившемся режиме работы при наличии повреждения обмотки ротора. В

первом случае данное явление обусловлено резким изменением скорости вращения АД, а также значения питающего напряжения при изменении частоты. По этой причине частота гармоники ФОР, появляющейся в спектре, изменяется практически так же, как и при пуске АД. Во втором случае возможность обнаружения

гармоники ФОР обусловлена значительным увеличением скольжения до 0,13, поэтому значение частоты гармоники ФОР заметно отличается от 49 Гц основной гармоники сигнала. При этом ее амплитуда достаточна для обнаружения в ЧВС тока статора АД даже при напряжении 33 В и в режиме холостого хода АД.

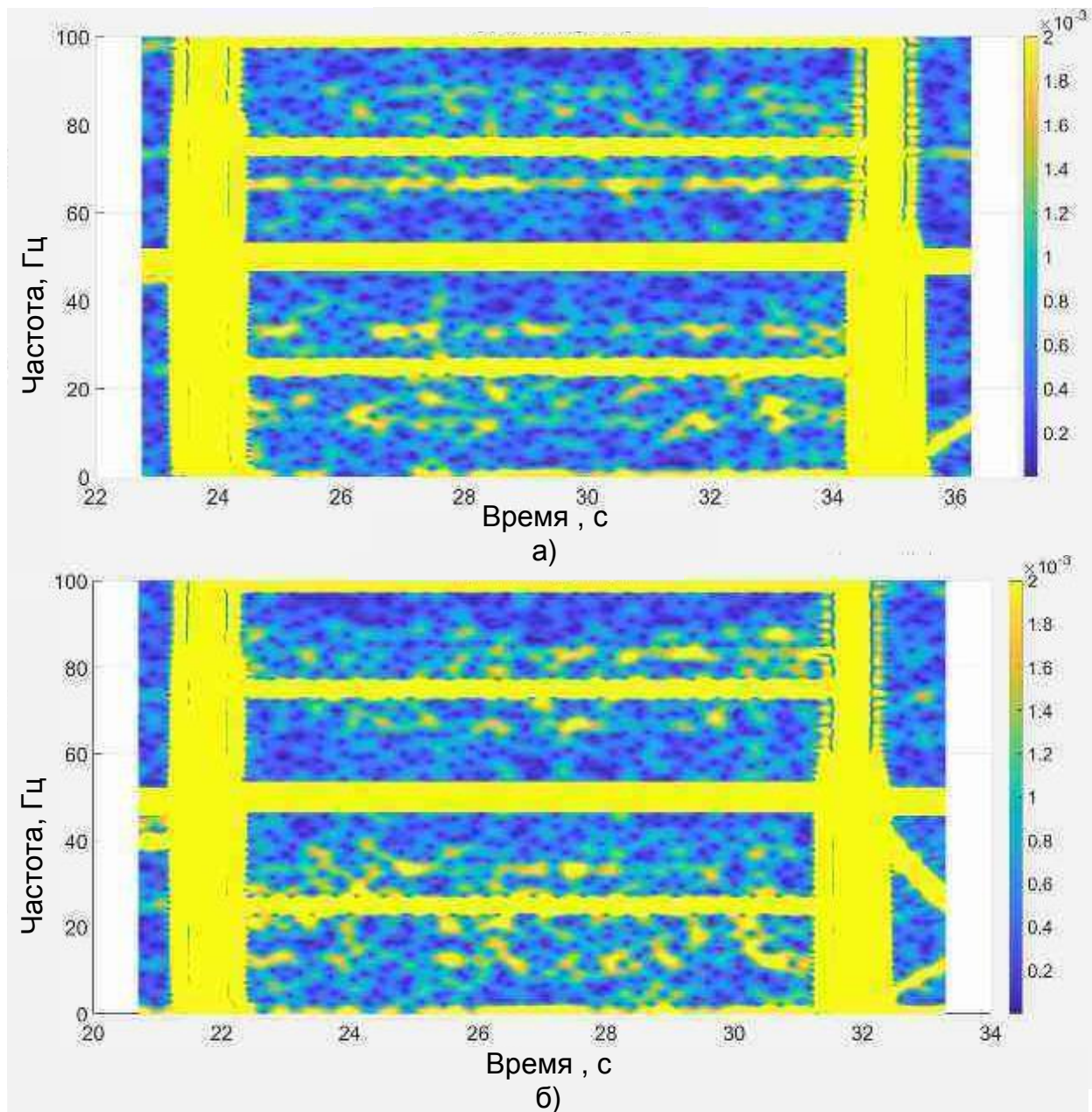


Рис. 4. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1 – установившийся режим с частотой 50 Гц и напряжением 380 В: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

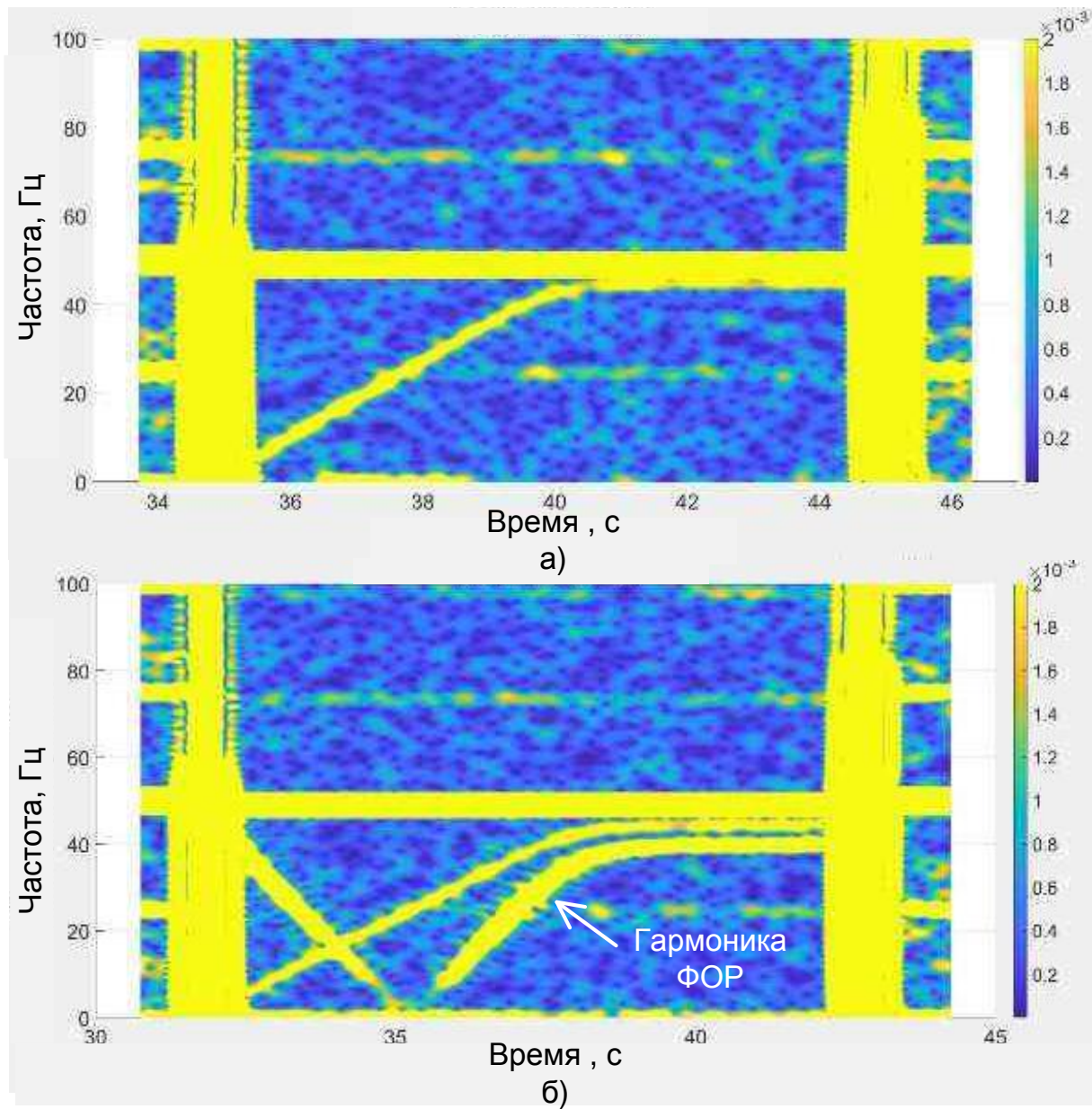


Рис. 5. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1 – участок с изменением частоты с 50 до 49 Гц и напряжения с 380 до 33 В и в установившемся режиме с частотой 49 Гц и напряжением 33 В: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

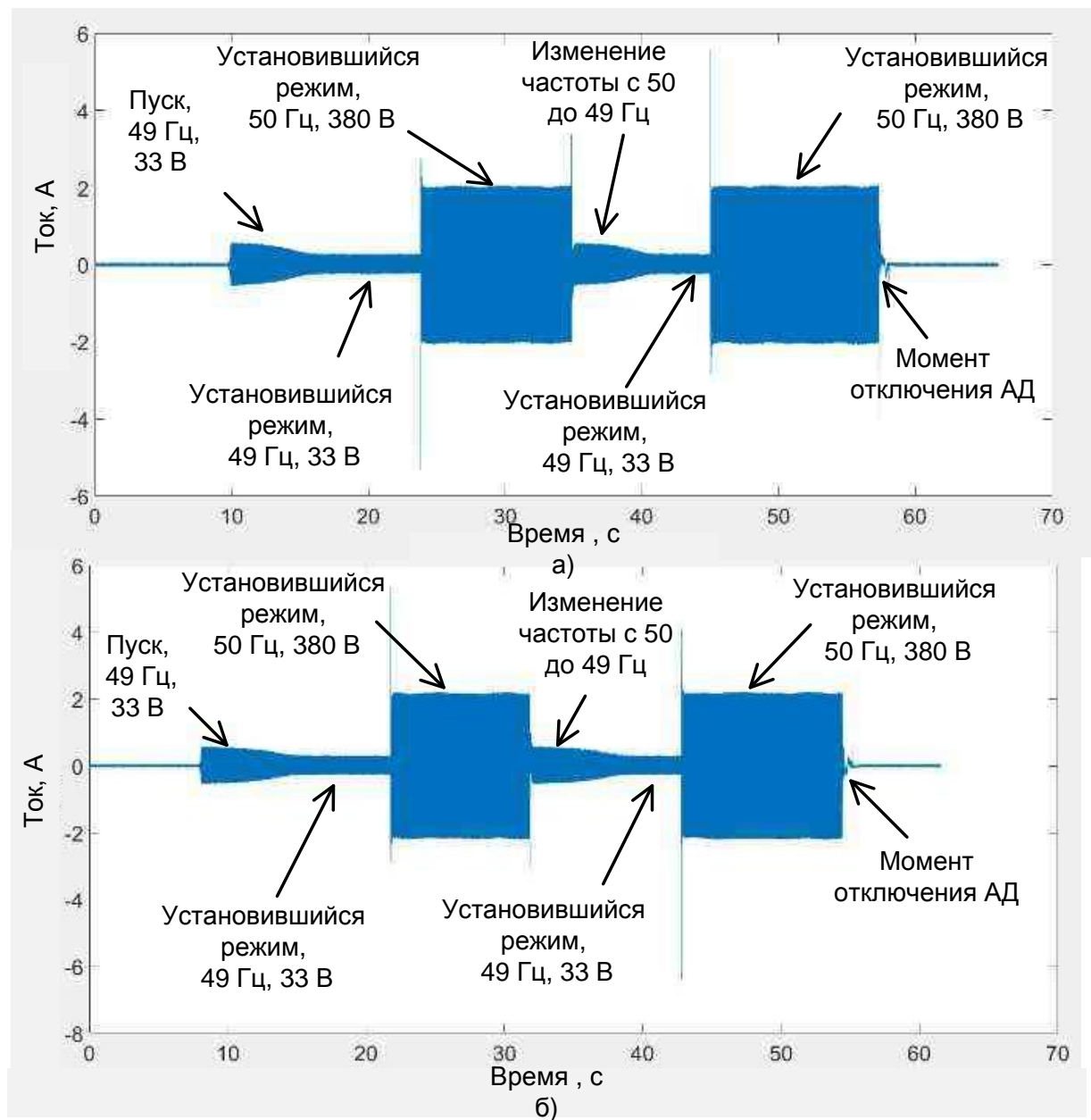


Рис. 6. Форма зарегистрированного сигнала тока статора в процессе опыта №1: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

ЧВС, полученные в ходе опыта №2, приведены на рис. 7, а более детальный их вид в режимах пуска и изменения частоты представлен на рис. 8 и 9 соответственно. Графики тока статора от времени представлены на рис. 10.

Анализ спектров, представленных на рис. 8, показал, что при повреждении обмотки ротора в спектре пускового сигнала отчетливо проявляется гармоника ФОР. В данном режиме значение частоты плавно увеличивается от 0 до установившегося значения, что согласуется с результатами,

полученными другими авторами [8, 10]. Анализ ЧВС на рис. 9 показывает, что при плавном изменении частоты гармонику ФОР можно увидеть не только при пуске, но и при снижении частоты, при этом в процессе снижения частоты гармоника ФОР отражается от оси, как и в случае резкого изменения напряжения и частоты. Кроме того, как и в предыдущем эксперименте, искомая гармоника может быть легко определена и в установившемся режиме работы.

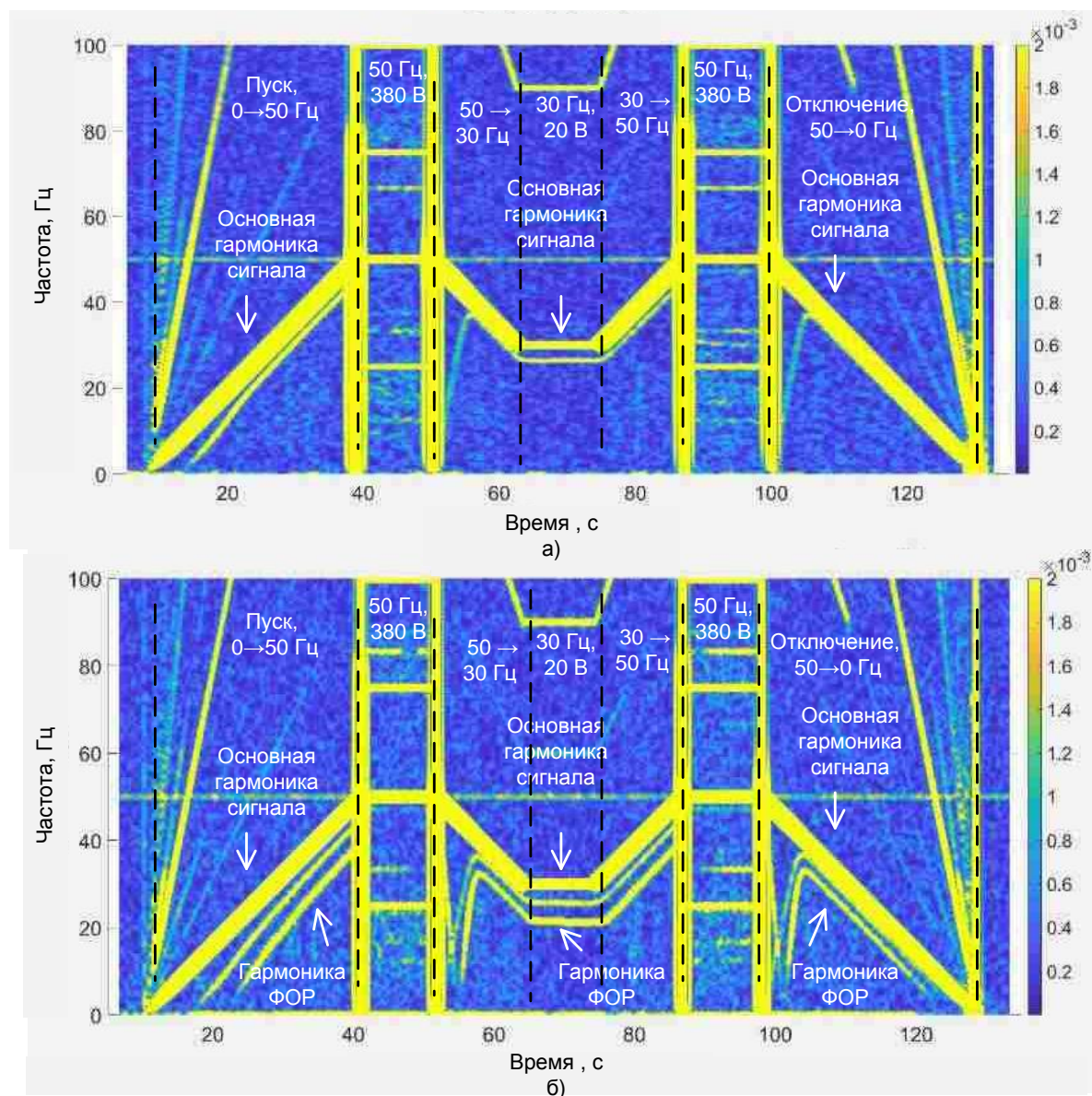


Рис. 7. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №2: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

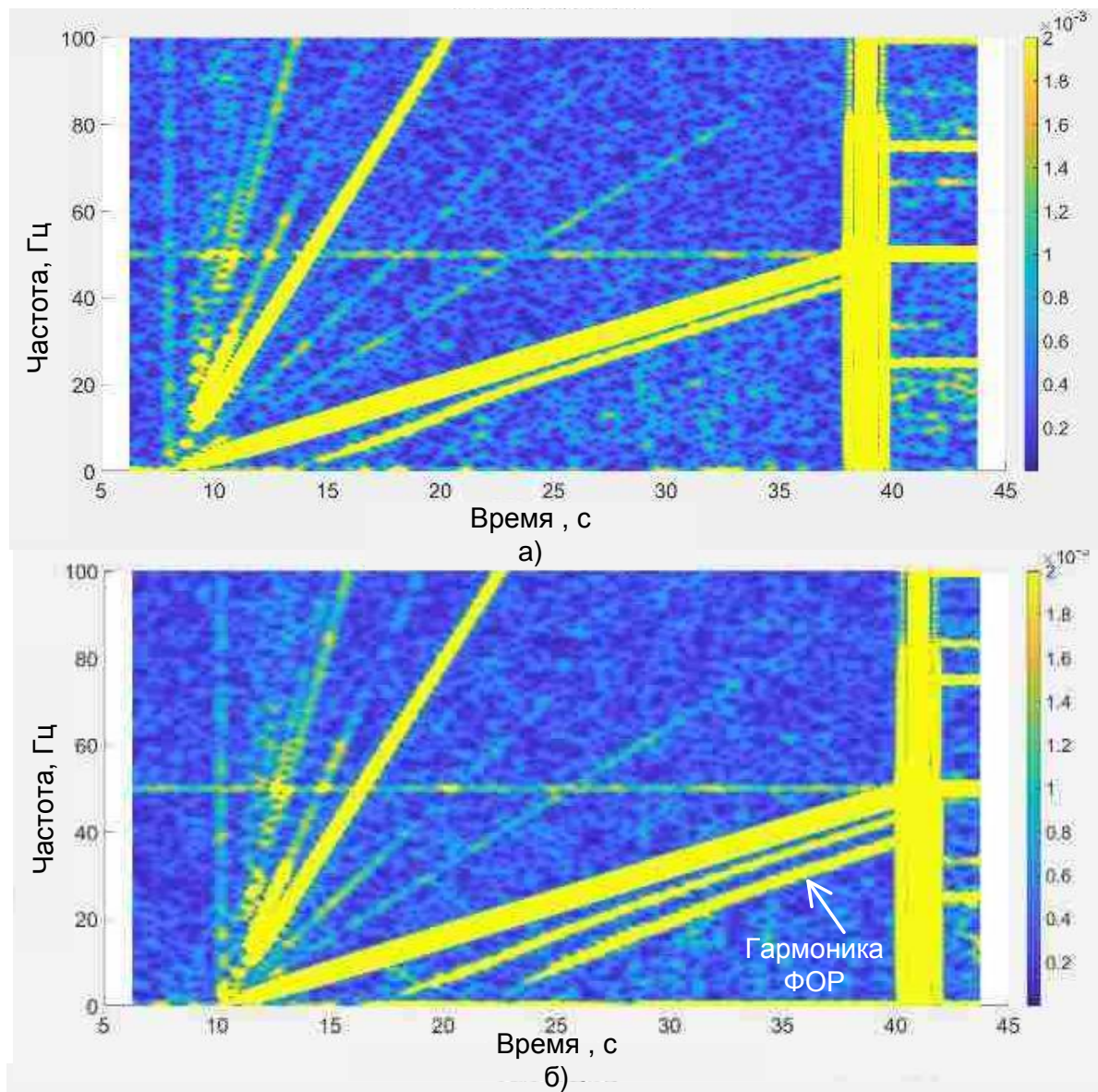


Рис. 8. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №2 – участок пуска АД при плавном увеличении частоты: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

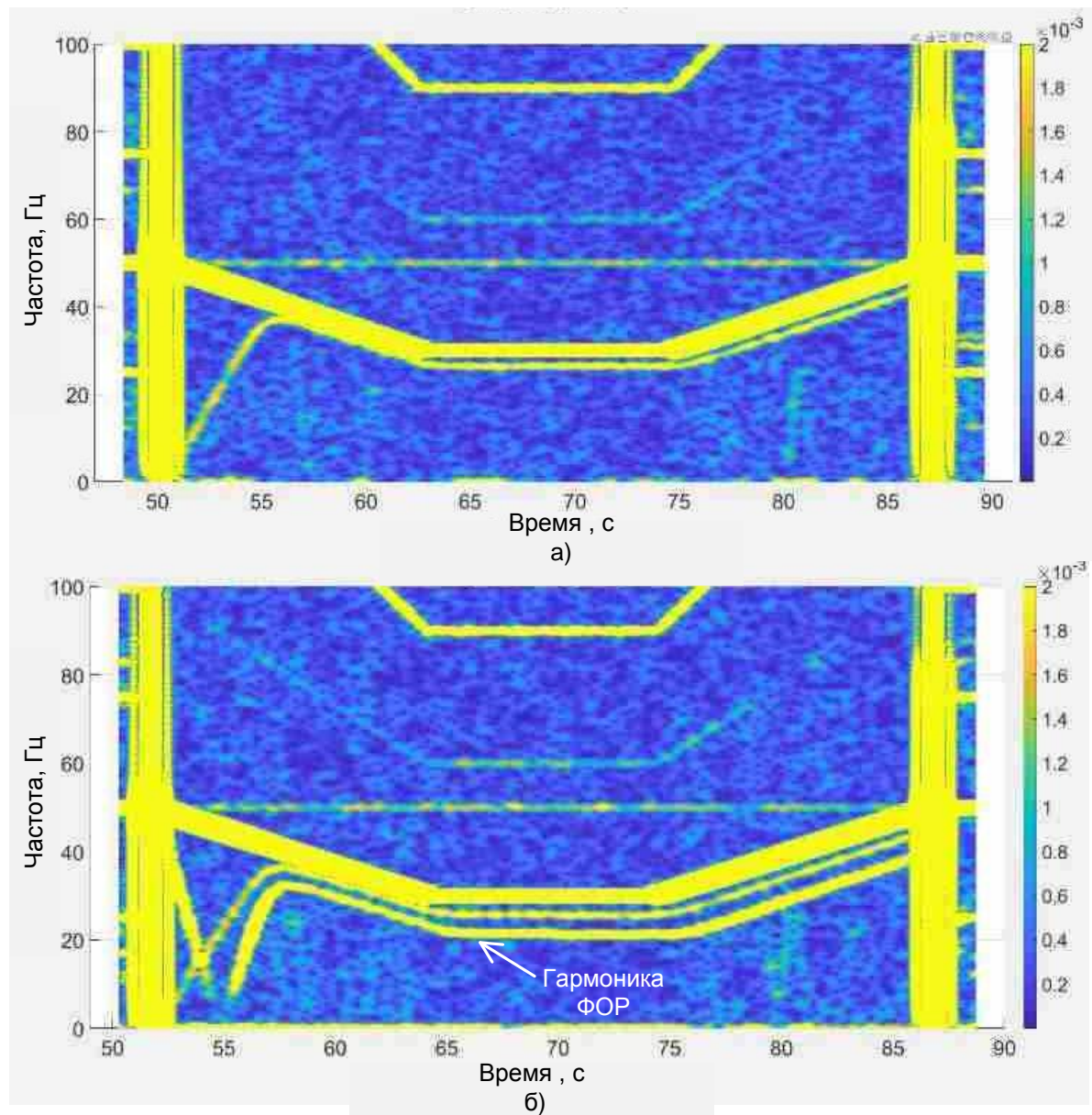


Рис. 9. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №2 – участок изменения частоты с 50 до 30 Гц и наоборот: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

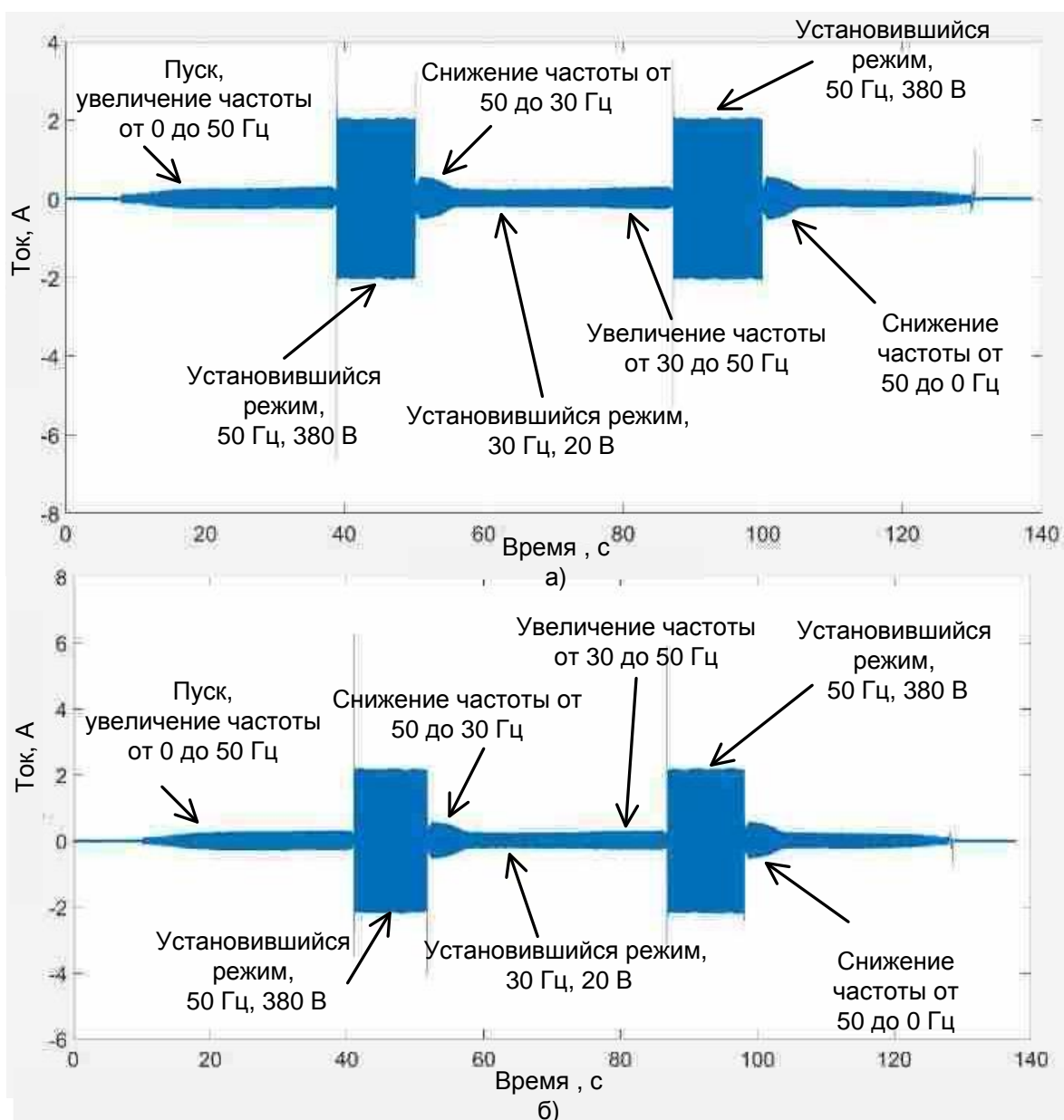


Рис. 10. Форма зарегистрированного сигнала тока статора в процессе опыта №2: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

Выводы. В ходе проведенных исследований экспериментально доказана возможность применения ПЧ в целях диагностики АД следующими способами:

1) путем пуска АД на пониженном напряжении с последующим его увеличением до номинального значения, что позволяет заметно увеличить время пуска и тем самым обеспечить возможность обработки пускового сигнала тока статора;

2) путем регулирования значения питающего напряжения в процессе эксплуатации АД, что позволяет значительно увеличить скольжение АД и тем самым облегчить обнаружение характерной при наличии обрывов стержней обмотки ротора гармоники (ФОР);

3) путем плавного изменения частоты в переходных режимах для увеличения их продолжительности.

Несмотря на ухудшение режимных параметров (снижение значений напряжения, тока статора и частоты), в ходе проведенных экспериментов в спектре сигналов тока статора удалось обнаружить гармонику ФОР, что подтверждает возможность проведения контроля подобными способами.

Таким образом, в ходе исследований показано, что в процессе диагностики нужно уделять внимание ПЧ не только как возможному источнику помех и искажения диагностической информации, но и как полезному инструменту для получения более достоверных сведений о состоянии АД.

Список литературы

1. **Babu W.R., Ravichandran C.S., Matheswaran V.** Performance Analysis of Medium Voltage Induction Motor Using Stator Current Profile // *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. – 2015. – Vol. 4, Issue 4. – P. 2129–2136.
2. **Андреева О.А.** Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций. – Павлодар: Кереку, 2015. – 142 с.
3. **Метод** контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей при пуске по току статора / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников и др. // *Дефектоскопия*. – 2020. – № 8. – С. 49–55.
4. **Instantaneous** Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars / M. Pineda-Sánchez, M. Riera-Guasp, J. Antonino-Daviu, et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56, No. 11. – P. 4557–4570.
5. **Вейнреб К.** Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // *Электричество*. – 2012. – № 7. – С. 51–57.
6. **Thomson W.T., Gilmore R.J.** Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, Data Interpretation and Industrial Case Histories // *Proceedings of 32nd Turbomachinery Symposium*, Texas, A&M University, USA. – Texas, 2003 September. – P. 145–156.
7. **Jokic S., Ikic S.** Condition assessment of the induction motor based on vibration and current signature analyses // *International Electrical Testing Association Journal NETAworld*. – 2018. – P. 66–70.
8. **Diagnosis** of Broken Rotor Bars during the Startup of Inverter-Fed Induction Motors Using the Dragon Transform and Functional ANOVA / V. Fernandez-Cavero, L.A. García-Escudero, J. Pons-Llinares, et al. // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, Issue 9. – P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/app11093769> (Accessed 24 February 2025).
9. **Rotor** Unbalance and Broken Rotor Bar Detection in Inverter-Fed Induction Motors at Start-up and Steady-State Regimes by High-Resolution Spectral Analysis / R.J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, D. Morinigo-Sotelo, et al. // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Vol. 133. – P. 142–148.
10. **Practical** Aspects of Broken Rotor Bars Detection in PWM Voltage-Source-Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motors / Zhu Hong-yu, Hu Jing-tao, G. Lei, H. Hao // *Journal of Applied Mathematics*. – 2013. – P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/128368> (Accessed 24 February 2025).
11. **Zaman Sh.Md.K., Liang X., Li W.** Fault Diagnosis for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors Using Wavelet Packet Decomposition and Greedy-Gradient Max-Cut Learning. *IEEE Access*. – 2021. – P. 1–13. URL: https://www.researchgate.net/publication/351184541_Fault_Diagnosis_for_Variable_Frequency_Drive-Fed_Induction_Motors_Using_Wavelet_Packet_Decomposition_and_Greedy-Gradient_Max-Cut_Learning (Accessed 24 February 2025).
12. **Broken** Rotor Bar Fault Diagnostic for DTC Fed Induction Motor Using Stator Instantaneous Complex Apparent Power Envelope Signature Analysis /

S. Lachtar, G. Adel, K. Koussa, et al. // *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*. – Sep. 2019. – Vol. 10, No. 3. – P. 1187–1196.

13. **О возможности** проведения контроля состояния асинхронных электродвигателей с частотно-регулируемым приводом методом спектрального анализа / А.Н. Назарычев, М.А. Захаров, А.С. Страхов и др. // *Вестник ИГЭУ*. – 2024. – Вып. 5. – С. 66–74.

14. **Новаков А.В., Гладков В.В.** Преобразователь частоты для диагностики асинхронных двигателей // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2022. – Вып. 3. – С. 153–158.

15. **Анализатор** спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, А.С. Страхов и др. // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 98–109.

References

1. Babu, W.R., Ravichandran, C.S., Matheswaran, V. Performance Analysis of Medium Voltage Induction Motor Using Stator Current Profile. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2015, vol. 4, issue 4, pp. 2129–2136.
2. Andreeva, O.A. *Razrabotka metodov diagnostiki dvigateley sobstvennykh nuzhd elektricheskikh stantsiy* [Development of diagnostic methods for auxiliary motors of power plants: monograph]. Pavlodar: Kereku, 2015. 142 p.
3. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A. Metod kontrolya sostoyaniya obmotok rotorov asinkhronnykh elektrodvigateley pri puske po toku statora [Method for monitoring the condition of rotor windings of asynchronous electric motors during starting by stator current]. *Defektoskopiya*, 2020, no. 8, pp. 49–55.
4. Pineda-Sánchez, M., Riera-Guasp, M., Antonino-Daviu, J., Roger-Folch, J., Pérez-Cruz, J., Puche-Panadero, R. Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4557–4570.
5. Veynreb, K. Diagnostika neispravnostey rotora asinkhronnogo dvigatelya metodom spektral'nogo analiza tokov statora [Diagnostics of rotor faults of an asynchronous motor by the method of spectral analysis of stator currents]. *Elektrichestvo*, 2012, no. 7, pp. 51–57.
6. Thomson, W.T., Gilmore, R.J. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, Data Interpretation and Industrial Case Histories. *Proceedings of 32nd Turbomachinery Symposium, Texas, A&M University, USA*. Texas, USA, September, 2003, pp. 145–156.
7. Jokic, S., Ikic, S. Condition assessment of the induction motor based on vibration and current signature analyzes. *International Electrical Testing Association Journal NETAworld*, 2018, pp. 66–70.
8. Fernandez-Cavero, V., García-Escudero, L.A., Pons-Llinares, J., Fernández, M.A., Duque-Perez, O., Morinigo-Sotelo, D. Diagnosis of Broken Rotor Bars during the Startup of Inverter-Fed Induction Motors Using the Dragon Transform and Functional ANOVA. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, issue 9, pp. 1–12. <https://doi.org/10.3390/app11093769> (Accessed 24 February 2025).

9. Romero-Troncoso, R.J., Garcia-Perez, A., Morinigo-Sotelo, D., Duque-Perez, O., Osornio-Rios, R.A., Ibarra-Manzano, M.A. Rotor Unbalance and Broken Rotor Bar Detection in Inverter-Fed Induction Motors at Start-up and Steady-State Regimes by High-Resolution Spectral Analysis. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 133, pp. 142–148.
10. Hong-yu, Zhu, Jing-tao, Hu, Lei, G., Hao, H. Practical Aspects of Broken Rotor Bars Detection in PWM Voltage-Source-Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motors. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/128368> (Accessed 24 February 2025).
11. Zaman, Sh.Md.K., Liang, X., Li, W. Fault Diagnosis for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors Using Wavelet Packet Decomposition and Greedy-Gradient Max-Cut Learning. *IEEE Access*, 2021, pp. 1–13. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351184541_Fault_Diagnosis_for_Variable_Frequency_Drive-Fed_Induction_Motors_Using_Wavelet_Packet_Decomposition_and_Greedy-Gradient_Max-Cut_Learning (Accessed 24 February 2025).
12. Lachtar, S., Adel, G., Koussa, K., Bouraiou, A., Attoui, I. Broken Rotor Bar Fault Diagnostic for DTC Fed Induction Motor Using Stator Instantaneous Complex Apparent Power Envelope Signature Analysis. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Sep. 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1187–1196.
13. Nazarychev, A.N., Zakharov, M.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Skorobogatov, A.A. O vozmozhnosti provedeniya kontrolya sostoyaniya asinkhronnykh elektrodvigately s chastotno-reguliruemym privodom metodom spektral'nogo analiza [On the possibility of monitoring the condition of asynchronous electric motors with variable-frequency drives using the spectral analysis method]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 5, pp. 66–74.
14. Novakov, A.V., Gladkov, V.V. Preobrazovatel' chastoty dlya diagnostiki asinkhronnykh dvigateley [Frequency converter for diagnostics of asynchronous motors]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2022, issue 3, pp. 153–158.
15. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A., Korovkin, N.V. Analizator spektra na osnove algoritma avtokorrektsii vremeni zapisi signala [Spectrum analyzer based on the algorithm for automatic correction of the signal recording time]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 98–109.

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

Многофазный электропривод переменного тока с улучшенными виброшумовыми характеристиками

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из важнейших задач, возникающих при разработке современных электроприводов, является улучшение их виброшумовых характеристик. В рамках традиционных трехфазных систем подходы к решению этой задачи достаточно хорошо изучены и в определенной степени себя исчерпали. Новые широкие возможности в этом плане открывает построение электромеханической системы переменного тока на основе исполнительных двигателей с увеличенным числом фаз статорной обмотки ($m > 3$).

Материалы и методы. Использован метод исследования регулировочных характеристик m -фазного двигателя на основе спектральных векторов электромагнитных параметров, приведенных к пространственным гармоникам поля.

Результаты. Предложены многоканальные принципы построения m -фазных асинхронного и синхронного электроприводов, обеспечивающие целенаправленное формирование электромагнитного состояния исполнительного двигателя по всем его энергетическим каналам как объекта управления. Рассмотрены способы его реализации.

Выводы. Целенаправленное формирование конфигурации магнитного поля в зазоре многофазных ($m > 3$) асинхронного и синхронного двигателей является одним из эффективных способов улучшения виброшумовых характеристик электромеханической системы за счет уменьшения тангенциальных и радиальных сил.

Ключевые слова: электропривод переменного тока, многофазный асинхронный двигатель, многофазный синхронный двигатель, временные гармоники, пространственные гармоники, тангенциальные силы, радиальные силы, виброшумовые характеристики

Aleksandr Nikolaevich Golubev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrical Technologies Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Multiphase AC electric drive with improved vibration-noise characteristics

Abstract

Background. One of the most important tasks when developing modern electric drives is to improve their vibration-noise characteristics. Within the framework of traditional three-phase systems, approaches to solve this problem are well studied and have exhausted themselves to some extent. In this regard, the development of an electromechanical alternating current system based on executive motors with an increased number of phases of the stator winding ($m > 3$) gives a wide range of new possibilities.

Materials and methods. The author has studied the adjustment characteristics of an m -phase motor based on spectral vectors of electromagnetic parameters reduced to spatial harmonics of the field.

Results. Multi-channel principles for the development of m -phase asynchronous and synchronous electric drives have been proposed. They ensure the targeted formation of the electromagnetic state of the executive motor along all the energy channels as a control object. The ways of its implementation have been considered.

Conclusions. The targeted formation of the magnetic field configuration in the gap of multiphase ($m > 3$) asynchronous and synchronous motors is one of the effective ways to improve the vibration-noise characteristics of an electromechanical system by reducing tangential and radial forces.

Key words: AC electric drive, multiphase asynchronous motor, multiphase synchronous motor, temporal harmonics, spatial harmonics, tangential forces, radial forces, vibration-noise characteristics

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.061-065

Введение. Одной из приоритетных задач, встающих при разработке современных электроприводов (ЭП), является оптимизация их виброшумовых характеристик. Подходы к решению этой задачи в рамках традиционных трехфазных ЭП достаточно хорошо изучены и в определенной степени себя исчерпали. В то же время новые широкие возможности в этом плане открывает построение электромеханической системы (ЭМС) переменного тока на основе исполнительных асинхронных (АД) и синхронных (СД) двигателей с увеличенным числом фаз статорной обмотки ($m > 3$). Указанное связано с двумя основными факторами. Во-первых, увеличение числа фаз при прочих равных условиях обуславливает снижение амплитуды пульсаций электромагнитного момента двигателя (при прямо пропорциональном увеличении m их частоты) [1–3], т. е. уменьшение тангенциальных сил. Это связано с тем, что увеличение числа фаз статорной обмотки обуславливает разрежение спектра пространственных гармонических магнитного поля в зазоре машины в направлении устранения из него асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных, обуславливающих дополнительные постоянные составляющие электромагнитного момента двигателя при его питании несинусоидальным напряжением [1, 4].

Иллюстрацией указанному являются полученные экспериментально зависимости относительных виброскоростей (по отношению к ее максимальному значению при $f = 50$ Гц) от числа фаз для АД с номинальными мощностью $P_H = 0,32$ кВт и напряжением $U_H = 10,5$ В (рис. 1).

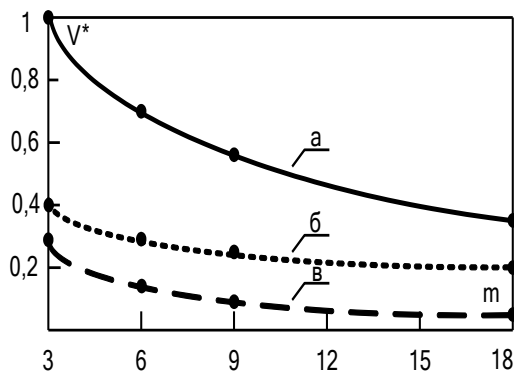


Рис. 1. Кривые относительных виброскоростей при частотах: а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 2,5 Гц

С другой стороны, увеличение числа фаз существенно расширяет возможности целенаправленного формирования конфигурации магнитного поля для снижения уровня вибраций за счет уменьшения радиальных сил, действующих на статорное кольцо и вызывающих его динамическую деформацию [6]. Ниже рассматриваются подходы к улучшению виброшумовых показателей ЭМС переменного тока, а также результаты исследований, иллюстрирующих их эффективность.

Материалы и методы. Исследования проводились для случая многоканального управления АД и СД. Как было отмечено, одной из причин возникновения вибраций являются радиальные магнитные силы, значения которых на единицу площади поверхности статора определяются по формуле Максвелла квадратом магнитной индукции в зазоре машины:

$$p(\alpha) = 40B_0^2(\alpha).$$

Очевидно, что если пространственной кривой распределения индукции в зазоре придать форму меандра, то теоретически пульсации радиальной силы в зазоре $p(\alpha)$ будут отсутствовать. Для статора и ротора радиальные составляющие магнитной индукции (зазор принимается гладким и $\mu \rightarrow \infty$) можно получить путем суммирования индукций отдельных фаз статора и ротора. Введя спектральный вектор электромагнитных переменных, приведенный к v -й пространственной гармонической (m -фазная обмотка выполнена в виде m/N N -фазных симметричных групп) [5]

$$\bar{Y}_{(v)} = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^{m/N} \sum_{k=1}^N y_{ik} e^{j\pi v \left[\frac{2}{N}(k-1) + \frac{1}{m}(i-1) \right]},$$

можно записать формулу для r -й гармонической радиальной силы [5]:

$$p_{rm} = \frac{\mu_0 q^2 m^2}{4\pi^2 \delta^2} \left| \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq 2k}}^{r-1} H_{(r)l} \bar{I}_{m(l)} \bar{I}_{m(r-l)} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 2k}}^m J_{(r)n} \bar{I}_{m(n+r)} \hat{I}_{m(n)} \right|,$$

где $H_{(r)l}$ и $J_{(r)n}$ – алгебраические функции коэффициентов распределения обмоток для v -й гармоники поля и порядка r радиальной силы [6].

С учетом уменьшения плеча радиальной силы с ростом порядка r на практике целесообразно ограничиться значениями $r \leq 4$. Тогда с учетом целевой функции минимизации потерь

$$\frac{I_{m(3)}^2}{I_{m(1)}^2} + \frac{I_{m(5)}^2}{I_{m(1)}^2} + \frac{I_{m(7)}^2}{I_{m(1)}^2} = \min$$

практические условия минимизации шумов [5] следующие:

$$p_{2\max} \leq 0,2 \frac{\mu_0 q^2 m^2}{4\pi^2 \delta^2} I_{m(1)}^2;$$

$$p_{4\max} \leq 0,1 \frac{\mu_0 q^2 m^2}{4\pi^2 \delta^2} I_{m(1)}^2.$$

На основе этих условий определяются желаемые соотношения

$$I_{m(v)} / I_{m(1)}.$$

Реализацию векторного принципа управления АД с улучшенными виброшумовыми по-

казателями обеспечивает ЭП, функциональная схема которого приведена на рис. 2, где для каждого из векторов тока предусмотрены два канала регулирования с регуляторами интегрального типа (БРТ). Алгоритм функционирования БКФ приведен в [5].

Расчетные значения радиальных магнитных сил для 9-фазного АД мощностью 2,5 кВт (номинальное напряжение 10,5 В) в данном ЭП приведены в таблице. Анализ показывает, что наиболее значимая в плане создания вибраций вторая пространственная гармоника радиальной

силы в 8 раз меньше, чем при работе АД при синусоидальном питании, и в 3 раза меньше, чем при простейшей прямоугольно-ступенчатой форме питающего напряжения. Аналогично виброскорость, обусловленная радиальными магнитными силами, также уменьшилась соответственно в 8 и 3 раза. На рис. 3 приведена расчетная кривая распределения магнитной индукции вдоль расточки магнитопровода 9-фазного АД в векторном ЭП при номинальной нагрузке.

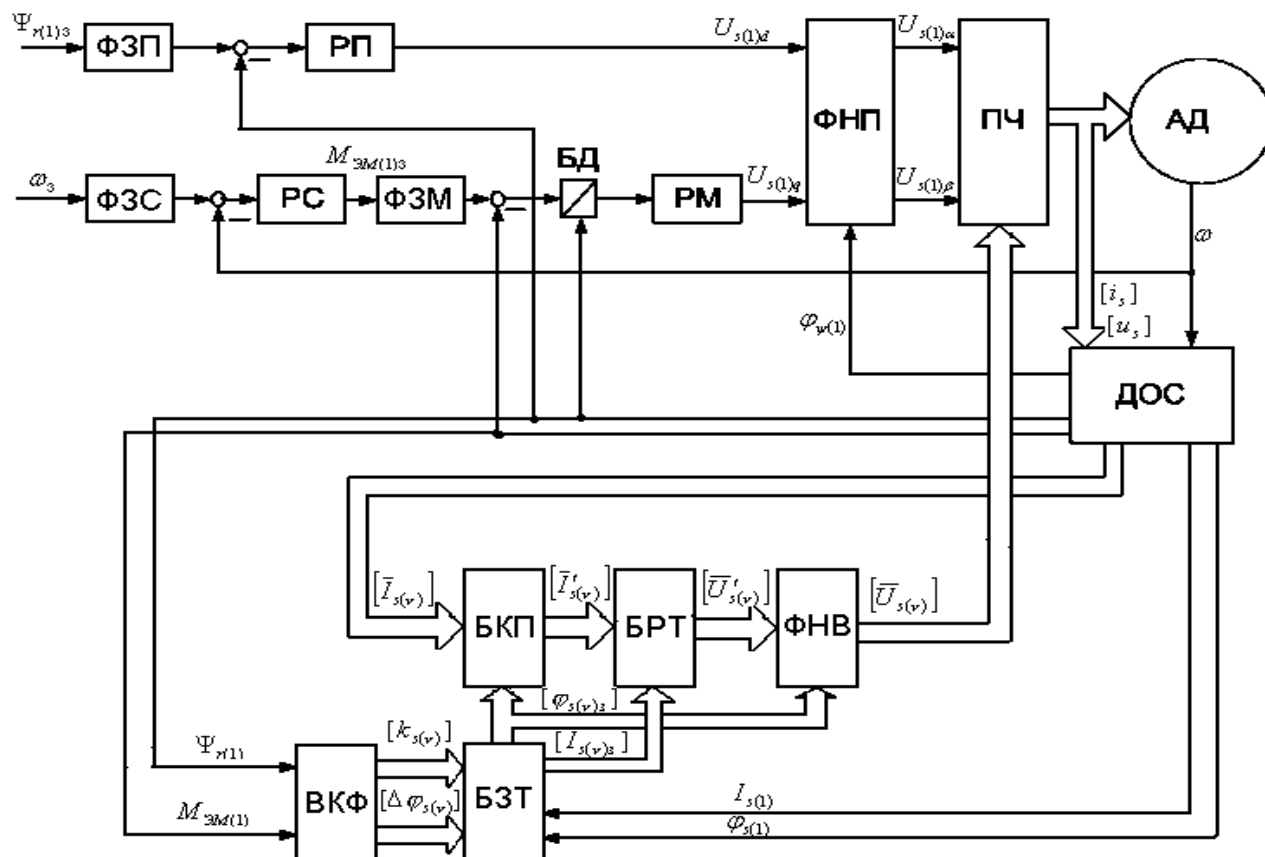
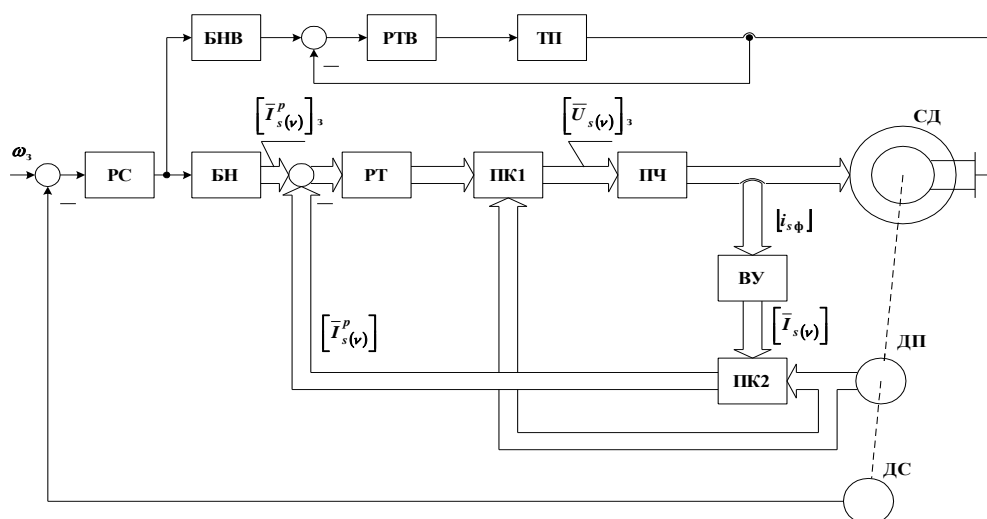


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема m -фазного ЭП: ФЗП, ФЗМ и ФЗС – фильтры задания потокосцепления, момента и скорости соответственно; РП, РМ и РС – регуляторы потокосцепления, момента и скорости соответственно; БД – блок деления; ФНП – формирователь вектора напряжения $\bar{U}_{s(1)}$; ДОС – датчик обратных связей; БКП – блок координатных преобразований; БРТ – блок регуляторов токов $\bar{I}_{s(v)}$; ФНВ – формирователь векторов напряжений; ВКФ – блок вычисления коэффициентов усиления и фазовых сдвигов векторов $\bar{I}_{s(v)}$ токов; БЗТ – блок задания токов $\bar{I}_{s(v)}$

Значения пространственных гармоник радиальных магнитных сил в 9-фазном АД

Режим работы	ρ_{2m} отн	ρ_{4m} отн
$M = M_H, \omega = \omega_H$	0,128	0,044
$M = 0,1 M_H, \omega = \omega_H$	0,143	0,055
$M = M_H, \omega = 0,001 \omega_H$	0,137	0,057
Ограничение момента ($M = 2M_H, \omega = \omega_H$)	0,596	0,204
Синусоидальное питание ($M = M_H, \omega = \omega_H$)	1,012	0

Как и в случае асинхронного ЭП, построение многофазной ЭМС на базе СД для наиболее полной реализации преимуществ, связанных с увеличением числа фаз статорной обмотки, следует осуществлять по многоканальному принципу, при котором каждой v -й подструктуре m -фазного СД как объекта управления соответствует свой канал регулирования [7]. Функциональная схема такого ЭП приведена на рис. 4.



Следует отметить, что для улучшения энергетических показателей спектральные векторы $\bar{I}_{s(v)} v > 1$ должны содержать только поперечные составляющие, т. е. $\bar{I}_{sd(v)} = 0$.

На практике для упрощения реализации ЭМС количество каналов управления можно ограничить числом, меньшим $B = m[(N-1)/2 + 0,5]/N$, так как энергетика СД в основном определяется низкочастотными гармоническими. С учетом этого для СД с $m \geq 7...9$ можно ограничить число каналов ($v \leq 7...9$), положив для высших порядков $v \overline{U}_{S(v)} = 0$.

Поставим задачу компромиссной минимизации магнитных шумов и действующего значения тока статора (при ограничении рассматриваемых гармонических) при обеспечении необходимого электромагнитного момента:

$$F_1 = p_{2m}^2 + \frac{\varphi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} I_s^2 = \min,$$

где $\phi \in (0;1)$ – некоторая вспомогательная функция.

В приведенной целевой функции учитывается только вторая гармоническая радиальной силы, определяющая основную величину

вибраций СД, так как вклад гармоники $r = 4$ в магнитный шум меньше в 16 раз.

Решение задачи оптимизации осуществляется по следующему алгоритму.

Сначала вычисляются составляющие векторов тока статора исходя из минимизации его действующего значения. Для этого вводится функция

$$F_2 = \sum_{v=1,3}^{v < m} I_{sq(v)}^2 + \lambda \left(M - \frac{m}{2} p \sum_{v=1,3}^{v < m} v i_f' L_{m(v)} I_{sq(v)} \right),$$

где $L_{m(v)}$ – параметр схемы замещения m -фазного СД [8]; p – число пар полюсов; λ – вспомогательная функция.

Решая уравнения $\frac{\partial F_2}{\partial I_{sq(v)}} = 0$ и $\frac{\partial F_2}{\partial \lambda} = 0$,

находим выражение для задающих значений $I_{sq(v)}$:

$$I_{sq(v)} = \frac{2M}{mp} \frac{vL_{m(v)}i_f'}{\sum_{v=13}^{v<m} (vL_{m(v)}i_f')^2}.$$

На втором этапе решается задача минимизации магнитных вибраций и тока статора с использованием функции

$$F_3 = p_{2d}^2 + p_{2q}^2 + \frac{\varphi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} I_{sd(1)}^2 = \min.$$

Решение уравнения $\frac{\partial F_3}{\partial I_{sd(1)}} = 0$ дает за-

данную величину $I_{sd(1)}$ для принятого значения параметра φ , определяющего требуемый уровень радиальной силы.

Проведенные численные эксперименты показали эффективность предложенного алгоритма оптимизации виброшумовых характеристик СД. В частности, для 9-фазного СД мощностью 2,5 кВт относительное значение суммарных амплитуд гармоник радиальных сил

$p_m^* = (p_{2m} + p_{4m} / 16)^*$ (по отношению к аналогичным параметрам 3-фазного СД той же мощности, питаемого синусоидальным напряжением) при номинальной нагрузке ($\varphi = 0,95$) равно 0,5, а при двойном моменте на валу СД – 0,45. При $I_{sd(1)} = 0$ указанные отношения равны соответственно 0,8 и 0,64.

Выводы. Целенаправленное формирование конфигурации магнитного поля в зазоре многофазных ($m > 3$) АД и СД является одним из эффективных способов улучшения виброшумовых характеристик ЭМС за счет уменьшения тангенциальных и радиальных сил.

Исследование предложенных структур асинхронного и синхронного ЭП с оптимизированными виброшумовыми показателями показало эффективность принятых решений.

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. Бразников В.Ф., Соустин Б.П. Теория установившихся электромагнитных процессов в многофазном асинхронном инверторном электроприводе: в 2 ч. / Краснояр. ун-т. – Красноярск, 1985. – 330 с.
3. Голубев А.Н., Лапин А.А. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 8–13.
4. 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.
5. Построение электроприводов переменного тока с пониженным уровнем шумов / С.С. Ананьев,

А.Н. Голубев, В.А. Мартынов, и др. // Электротехника. – 2015. – № 5. – С. 30–35.

6. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

7. Голубев А.Н. Синхронный многофазный электропривод с управлением по многоканальному принципу // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 62–67.

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

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. Brazhnikov, V.F., Soustin, B.P. *Teoriya ustannovivshikhsya elektromagnitnykh protsessov v mnogofaznom asinkhronnom invertornom elektroprivoде: v 2 ch.* [Theory of steady-state electromagnetic processes in a multiphase asynchronous inverter electric drive: in 2 part]. Krasnoyarsk, 1985. 330 p.
3. Golubev, A.N., Lapin, A.A. Matematicheskaya model' sinkhronnogo dvigatelya s mnogofaznoy statornoy obmotkoy [Mathematical model of a synchronous motor with a multiphase stator coil]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 8–13.
4. Kats, Yu.G. Vzaimodeystvie vremennykh i prostranstvennykh garmonik v mnogofaznoy elektricheskoy mashine [Interaction of temporal and spatial harmonics in a multiphase electric machine]. *Voprosy teorii i rascheta moshchnykh elektromashinno-tiristornykh kompleksov* [Theory and calculation issues of powerful electric machine-thyristor complexes]. Leningrad: VNIIElektromash, 1979, pp. 90–99.
5. Anan'ev, S.S., Golubev, A.N., Martynov, V.A., Karachev, V.D., Aleynikov, A.V. Postroenie elektroprivodov peremennogo toka s ponizhennym urovnem шумов [Construction of AC electric drives with a reduced noise level]. *Elektrotehnika*, 2015, no. 5, pp. 30–35.
6. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in asynchronous machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p.
7. Golubev, A.N. Sinkhronnyy mnogofaznyy elektroprivod s upravleniem po mnogokanal'nomu printsipu [Synchronous multiphase electric drive with multichannel control]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 62–67.
8. Golubev, A.N., Lapin, A.A. Matematicheskaya model' sinkhronnogo dvigatelya s mnogofaznoy statornoy obmotkoy [Mathematical model of a synchronous motor with a multiphase stator coil]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 8–13.

УДК 621.313

Виктор Николаевич Караулов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

Евгений Александрович Курлаков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: tukkto@gmail.com

Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой в установившихся и переходных режимах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Конструкция синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой отличается от классической: нет явно выраженных полюсов; сердечник ротора имеет внутренние пазы, залитые алюминием; конфигурация пазов сложна и разнообразна; сердечник имеет сильно насыщенные участки. В настоящее время расчеты режимов работы синхронного реактивного двигателя выполняют с помощью полевых моделей двигателя. Актуально показать, что классическая параметрическая модель синхронной машины позволяет достоверно рассчитывать режимы работы синхронного реактивного двигателя. Для этого необходимо разработать метод определения параметров модели синхронного реактивного двигателя.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием классической параметрической модели синхронного реактивного двигателя, основанной на теории двух реакций, на основании результатов полевого расчета статического и пульсирующего продольного и поперечного магнитного поля. Для расчета установившихся и переходных режимов работы синхронного реактивного двигателя использованы уравнения Парка-Горева.

Результаты. Представлены метод расчета параметров модели синхронного реактивного двигателя, полевые модели и формулы, используемые для расчета параметров синхронного реактивного двигателя. С использованием уравнений Парка-Горева произведены расчеты электромеханических процессов в синхронном реактивном двигателе: прямого пуска двигателя при симметричном питании; работы синхронного реактивного двигателя при несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования синхронного реактивного двигателя в среде Ansys Maxwell.

Выводы. Классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя при различных условиях питания и механической нагрузке.

Ключевые слова: синхронный реактивный двигатель, TLA-ротор, демпферная обмотка, параметрическая модель, полевое моделирование, статическое магнитное поле, пульсирующее магнитное поле, переходные режимы работы двигателя

Viktor Nikolaevich Karaulov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

Evgeniy Aleksandrovich Kurlakov

Ivanovo State Power Engineering University, Master's Degree Student of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tukkto@gmail.com

Parametric model of synchronous reluctance motor with a TLA-rotor and damper winding in steady-state and transient modes

Abstract

Background. The design of a synchronous reluctance motors with a TLA rotor and a damper winding (SynRM) differs from the classical one. There are no salient poles, the rotor core has internal slots filled with aluminum, the slots configuration is complex and diverse, the core has highly saturated areas. Currently, calculations of the operating modes of the SynRM are performed using field models of the motor. It is important to show that the classical parametric model of a synchronous machine makes it possible to reliably calculate the operating modes of the SynRM. It is necessary to develop a method to determine the parameters of the SynRM model.

Materials and methods. The study has been conducted using a classical parametric model of a synchronous reluctance motor based on the theory of two reactions. It is based on the results of a field calculation of static and pulsating

longitudinal and transverse magnetic field. The Park-Gorev equations have been used to calculate steady-state and transient modes of the motor.

Results. Field models and formulas used to calculate the parameters of the SynRM are presented. The authors have used the Park-Gorev equations to calculate electromechanical processes in a synchronous reluctance motor: direct start of the motor with symmetrical power supply; operation of a SynRM with asymmetrical power supply. The calculation results are compared with the results of field simulation of the SynRM in the Ansys Maxwell environment.

Conclusions. The classical parametric model of the synchronous machine based on the theory of two reactions allows fast and high-quality analysis of steady-state and transient modes of operation of a synchronous reluctance motor with TLA-rotor under various conditions of power supply and mechanical load.

Key words: synchronous reluctance motor, TLA rotor, damper winding, parametric model, static magnetic field, pulsating magnetic field, transient modes of motor operation

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.066-072

Введение. Синхронные реактивные двигатели (СРД) с TLA-ротором получили широкое распространение в системах автоматического управления [1, 2, 3, 4] в силу целого ряда их достоинств: низкой стоимости; высокого КПД; возможности точного регулирования скорости в широком диапазоне [5]; небольших пульсаций вращающего момента [6]. В [7, 8, 9] показано, что энергоэффективность и энергоемкость СРД больше, чем у асинхронных двигателей. СРД имеют следующие конструктивные особенности: сердечник TLA-ротора имеет поперечную шихтовку; внутренние пазы и сильно насыщенные участки; конфигурация пазов в различных СРД сложная и разнообразная; алюминиевая демпферная обмотка располагается в немагнитных пазах ротора. В [10, 11] и во множестве других работ показано, что для управления СРД целесообразно использовать параметрическую модель двигателя, параметры которой должны рассчитываться с учетом насыщения стальных участков.

В [12] предложено рассчитывать параметры СРД по величине параметров асинхронного двигателя, статор которого соответствует статору рассматриваемого СРД. При расчете параметров схемы замещения асинхронного двигателя использованы его каталожные данные. В [13, 14] показано, что при построении систем управления реактивной электрической машиной необходимо учитывать изменение величины параметров обмотки якоря в процессе работы электропривода, получен алгоритм идентификации параметров в стационарном режиме работы машины. В [15, 16, 17] выполнен анализ и оптимизация конструкции ротора СРД на основе расчетов электромагнитного поля СРД в стационарном режиме работы машины. В [18] индуктивные параметры СРД рассчитаны исходя из расчетов электромагнитного поля.

Возможность использования классической модели СРД, основанной на теории двух реакций, при моделировании процессов в СРД с TLA-ротором показана в [19], где представлен метод расчета индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям X_{ad} и X_{aq} , основанный на результатах полевых расчетов двух статических состояний магнитного поля с учетом насыщения магнитной цепи.

Актуальной является задача разработки параметрической модели СРД с TLA-ротором с

учетом демпферной обмотки, предназначенной для расчета установившихся и переходных режимов работы двигателя. Параметры демпферной обмотки следует определять исходя из расчетов электромагнитного поля, что позволяет учесть особенности ее конструкции.

Ниже представлен метод расчета активного и индуктивного сопротивлений рассеяния приведенных продольной и поперечной демпферных обмоток. Параметры демпферных обмоток вычисляются на основе полевых расчетов, моделирующих опыт однофазного питания двух фаз. Описаны полевые модели исследуемого СРД при продольном и поперечном положениях ротора. Приведены формулы для расчета параметров демпферных обмоток.

Расчеты установившихся и переходных режимов работы СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой выполнены на основе уравнений Парка-Горева. Рассчитан процесс прямого пуска и установившийся режим работы СРД при симметричном и несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой в среде Ansys Maxwell.

Материалы и методы. На рис. 1 представлена конструкция исследуемого СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой, имеющего следующие технические показатели: номинальная мощность 75 кВт; номинальное фазное напряжение 380 В; номинальный фазный ток 86 А; номинальная частота вращения 1500 об/мин; число фаз 3; частота питающего напряжения 50 Гц.

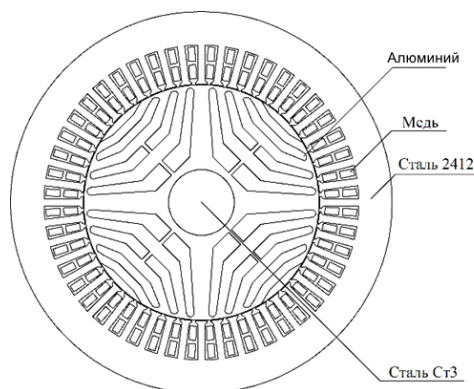


Рис. 1. Конструкция СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой

Параметрическая модель СРД. Моделью СРД в установившихся и переходных режимах работы служит система дифференциальных уравнений Парка-Горева, записанных в осях d , q , 0 (ось d опережает ось q):

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + i_d r_1 + \psi_q \omega, \\ u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + i_q r_1 - \psi_d \omega, \\ u_0 &= i_0 r_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt}, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} + i_{kd} r_{kd}, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} + i_{kq} r_{kq}, \\ \psi_d &= \frac{x_d(i_d) i_d + x_{ad}(i_d) i_{kd}}{\omega}, \\ \psi_q &= \frac{x_q(i_q) i_q + x_{aq}(i_q) i_{kq}}{\omega}, \\ \psi_{kd} &= \frac{(x_{ad}(i) + x_{kd}) i_{kd} + x_{ad}(i) i_d}{\omega}, \\ \psi_{kq} &= \frac{(x_{aq}(i) + x_{kq}) i_{kq} + x_{aq}(i) i_q}{\omega}, \\ M_{\text{эм}} &= M_B + J \frac{d\Omega}{dt}, \\ M_{\text{эм}} &= 1,5 \cdot p (i_d \psi_q - i_q \psi_d). \end{aligned} \quad (1)$$

Сопротивления, используемые в уравнениях (1), являются параметрами СРД с ТЛА-ротором. Индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$ зависят от конструкции ТЛА-ротора, насыщения магнитной цепи и, соответственно, от величины тока якоря. Зависимости $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$ рассчитываются согласно методу, представленному в [19]. Активное и индуктивное сопротивление рассеяния продольной демпферной обмотки (r_{kd} , x_{kd}) и поперечной демпферной обмотки (r_{kq} , x_{kq}) не зависят от насыщения магнитной цепи.

Расчет параметров демпферной обмотки. Параметры демпферной обмотки r_{kd} , x_{kd} и r_{kq} , x_{kq} рассчитаны на основе полевого моделирования опыта однофазного питания двух фаз. В опыте воспроизведены условия протекания тока статора обратной последовательности при поперечном и продольном положениях ротора. Ток статора создает пульсирующий магнитный поток, направленный по поперечной оси ротора (рис. 2,а) и по продольной оси ротора (рис. 2,б).

На рис. 2 показаны линии магнитной индукции. Пульсирующий магнитный поток статора проходит в роторе по путям рассеяния демпферной обмотки (вытесняется из ротора).

На рис. 3,а представлены осциллограммы тока и напряжения в фазе статора при поперечном положении ротора; на рис. 3,б – при продольном положении ротора.

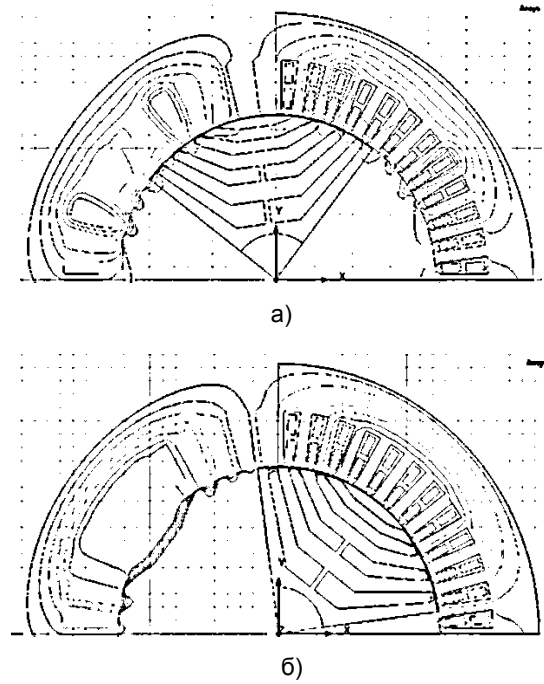


Рис. 2. Пульсирующий магнитный поток, направленный: а – по поперечной оси ротора; б – по продольной оси ротора

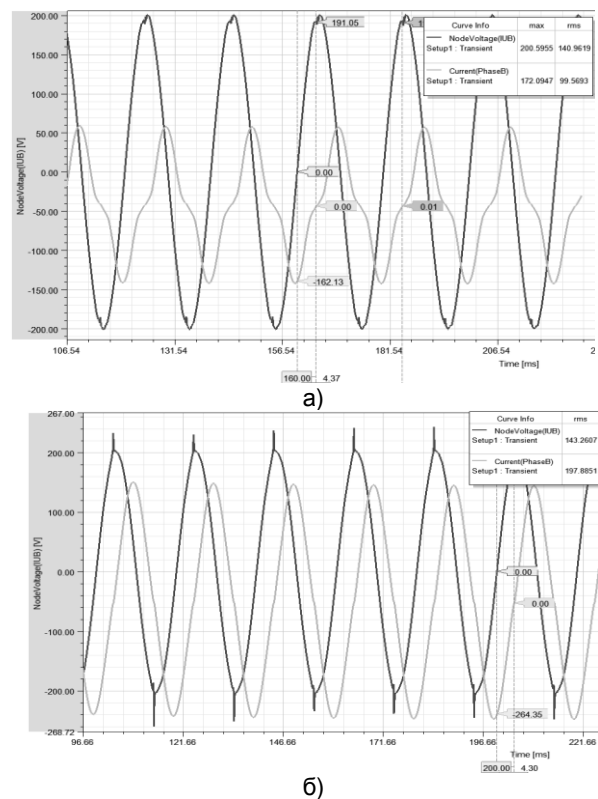


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения в фазах статора: а – при поперечном положении ротора; б – при продольном положении ротора

На основании полученных осциллограмм (рис. 3,а) найдены действующие значения напряжения и тока обратной последовательности в фазе статора (U_{2q} , I_{2q}); сдвиг по фазе кривых напряжения и тока (φ_q), рассчитано полное

(z_{2q}), активное (r_{2q}) и индуктивное (x_{2q}) сопротивление фазы для тока обратной последовательности I_{2q} :

$$z_{2q} = \frac{U_{2q}}{I_{2q}}; \quad r_{2q} = z_{2q} \cos(\varphi_q); \quad x_{2q} = z_{2q} \sin(\varphi_q).$$

Параметрическая модель СРД с демпферной обмоткой при пульсации магнитного потока по поперечной оси ротора имеет вид, показанный на рис. 4.

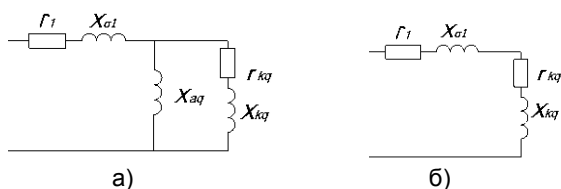


Рис. 4. Параметрическая модель СРД с демпферной обмоткой при пульсации магнитного потока по поперечной оси ротора: а – точная модель; б – упрощенная модель

Активное и индуктивное сопротивления рассеяния фазы приведенной поперечной демпферной обмотки рассчитаны по формулам:

$$r_{kq} = r_{2q} - r_1 = 0,254 \text{ Ом}; \quad x_{kq} = x_{2q} - x_{\sigma 1} = 0,876 \text{ Ом},$$

где r_1 и $x_{\sigma 1}$ – активное сопротивление проводов и индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора.

Аналогично, с помощью осциллограммы (рис. 3,б), рассчитаны активное и индуктивное сопротивления рассеяния фазы приведенной продольной демпферной обмотки $r_{kd} = 0,121 \text{ Ом}$ и $x_{kd} = 0,304 \text{ Ом}$.

Расчет переходных процессов в СРД при симметричном питании. Переходные и установившиеся процессы в СРД рассчитываются путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) с использованием зависимостей $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$, представленных на рис. 5, и неизменных по величине сопротивлений r_1 , $x_{\sigma 1}$, r_{kd} , x_{kd} , r_{kq} , x_{kq} .

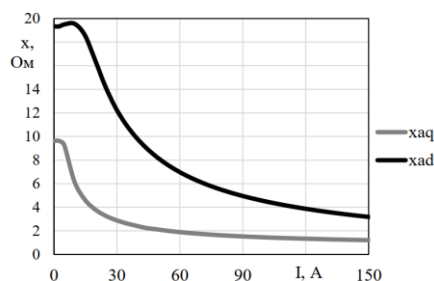


Рис. 5. Зависимости $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$

Расчет электромеханического процесса прямого пуска СРД с ТЛА-ротором и демпферной обмоткой выполнен при номинальном тормозном моменте на валу $M_n = 478 \text{ Н·м}$. Потери в стали и механические потери не учитывались.

Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов в Ansys Maxwell.

На рис. 6 показано изменение частоты вращения ротора в ходе процесса пуска СРД; на рис. 7 – изменение электромагнитного момента; на рис. 8 – изменение тока в фазах статора.

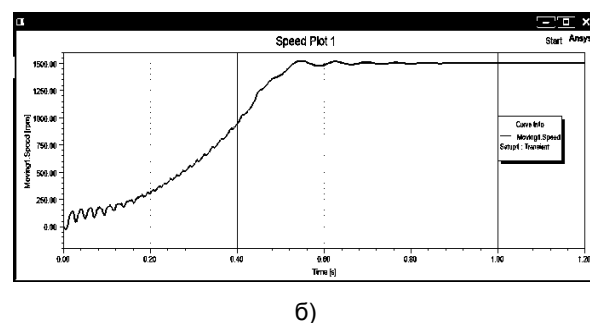
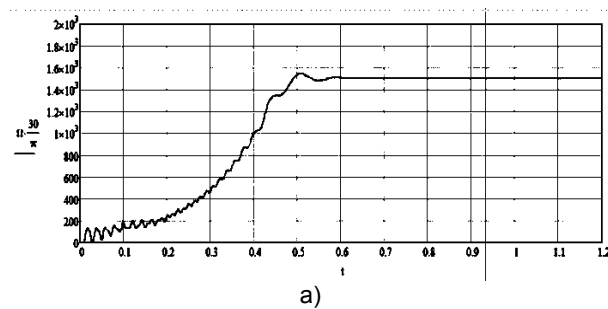


Рис. 6. Частота вращения ротора: а – инженерный расчет; б – полевой расчет в Ansys Maxwell

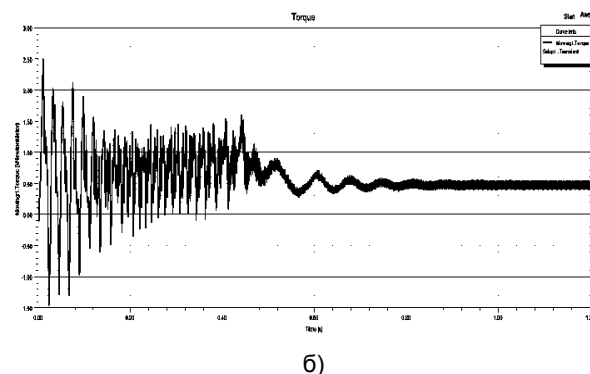
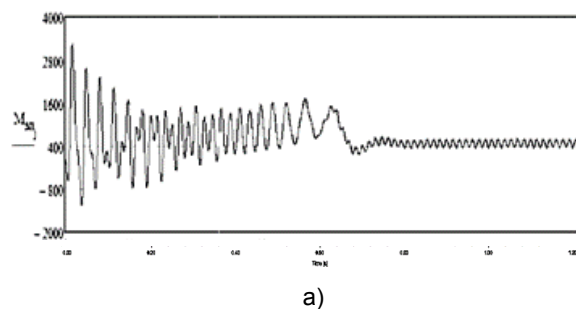


Рис. 7. Электромагнитный момент: а – инженерный расчет; б – полевой расчет в Ansys Maxwell

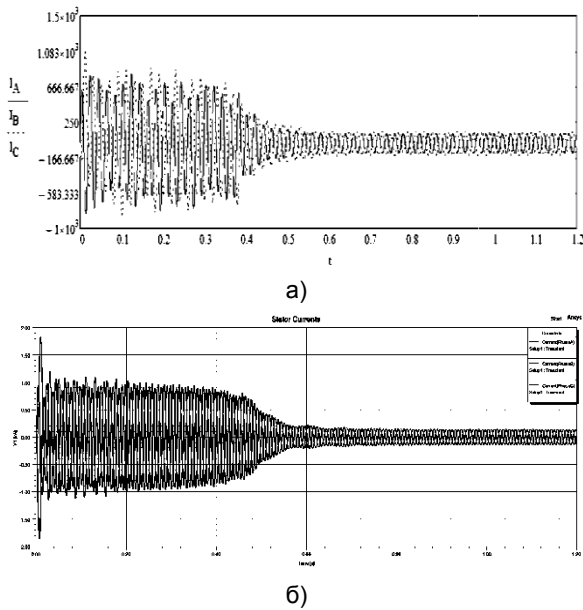


Рис. 8. Изменение тока в фазах статора: а – инженерный расчет; б – полевой расчет в Ansys Maxwell

Расчет установившихся процессов в СРД при несимметричном питании. На рис. 9–11 и в таблице представлены результаты расчета установившегося электрохимического процесса работы СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой при несимметричном питании: в одной из фаз величина амплитуды напряжения увеличена на 5 %, угол сдвига по фазе увеличен на 2,75 градуса. Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов в Ansys Maxwell.

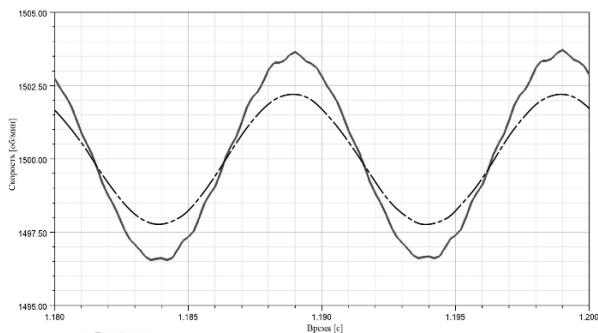


Рис. 9. Частота вращения ротора: — — — — полевой расчет; — — — — инженерный расчет

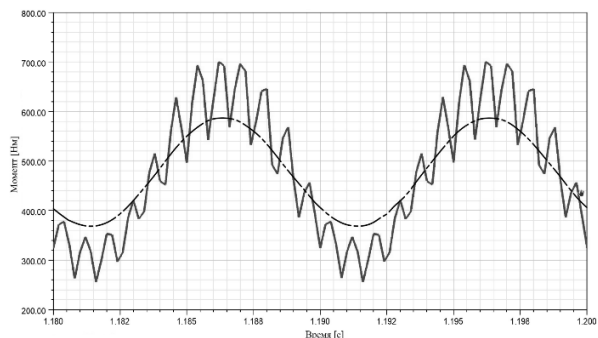


Рис. 10. Электромагнитный момент СРД: — — — — полевой расчет; — — — — инженерный расчет

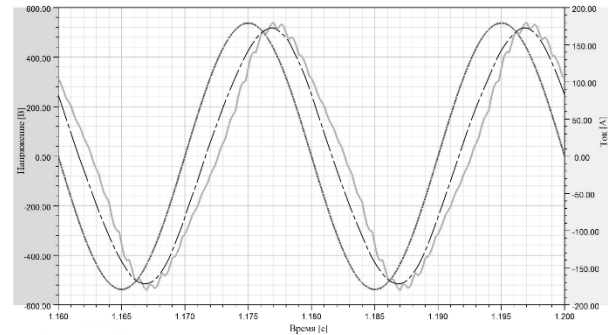


Рис. 11. Напряжение и ток в фазе статора: — — — — напряжение; — — — — инженерный расчет; — — — — полевой расчет

Энергетические показатели машины в установившемся режиме работы при несимметричном питании рассчитаны по следующим формулам:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (M \omega) dt}{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) dt};$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) dt}{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C},$$

Энергетические показатели исследуемого СРД в установившемся режиме работы при несимметричном питании

Энергетические показатели	Инженерный расчет	Ansys Maxwell
η	0,974	0,964
$\cos(\varphi)$	0,665	0,6827

Выводы. Классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой при различных условиях питания и механической нагрузке.

Представленный метод расчета параметров демпферной обмотки, основанный на результатах полевых расчетов при двух положениях ротора, позволяет рассчитать активное и индуктивное сопротивления рассеяния фазы приведенной продольной и поперечной демпферных обмоток.

Список литературы

1. Шульга Р.Н. Синхронный реактивный двигатель в современном электроприводе // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2023. — № 1. — С. 44–55. — EDN JMGRWE.

2. **Тихомиров О.И.** Синхронные реактивные электродвигатели для создания энергоэффективных решений класса IE5 // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 42–44. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.09. – EDN UNYBKL.

3. **Jeong C.** Performance Analysis of Dual Three-Phase Synchronous Reluctance Motor According to Winding Configuration // Proceedings of the IEEE. Science Journal IEEE transactions on magnetics. – 2024.

4. **Fiorito A.** Rotor Optimization of a Synchronous Reluctance Machine for Railway Applications Conference // 2024 International. Conference on Electrical Machines (ICEM) MM Science Journal. – 2024. DOI:10.1109/ICEM60801.2024.10700068

5. **Митрофанов И.И.** Оптимальное по точности управление угловой скоростью синхронного реактивного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 11-1. – С. 186–190. – EDN PYURRB.

6. **Птах Г.К.** Сравнительная оценка электрических двигателей переменного тока асинхронного и синхронного типов с целью применения их в гребных электроустановках ледоколов большой мощности // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 24–30. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. – EDN ISPZZZ.

7. **Zakharov A.V., Malafeev S.I., Dudulin A.L.** Synchronous reluctance motor: Design and experimental research // 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – Novocherkassk, 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.

8. **Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison / M. Murataliyev, M. Degano, M. Di Nardo, et al.** // Proceedings of the IEEE. – 2022. – Vol. 110, No. 3. – P. 382–399. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.

9. **Сравнение** энергопотребления асинхронного и синхронного реактивного двигателей в насосном приложении / А.С. Парамонов, В.М. Казакбаев, С.Х. Ошурбеков, В.А. Прахт // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н.И. (1945–2015) (Даниловские чтения), Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г. – Екатеринбург, 2019.

10. **Nonlinear magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor / Y. Han, X. Wu, G. He, et al.** // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – P. 11053–11063.

11. **Choi J. -s., Ko J. -s., Chung D. -h.** Efficiency Optimization Control of SynRM Drive // SICE-ICASE International Joint Conference. – Busan, Korea (South), 2006. – P. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.

12. **Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А.** Расчет рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя в приводе насоса // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014): материалы III Междунар. конф., Екатеринбург, 17–20 марта 2014 г. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 238–243. – EDN VULCJB.

13. **Самосейко В.Ф., Шарашкин С.В., Гельвер Ф.А.** Идентификация параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. – EDN YTXYGX.

14. **Delpoux R., Kader Z., Huguet T.** Observer-Based Flux Controller for Synchronous Reluctance Motor Including Magnetic Saturation // Science Journal IEEE transactions on magnetics. – 2024.

15. **Synchronous Reluctance Motor: Design, Optimization and Validation / M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, et al.** // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). – 2018. – P. 1297–1302. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445304.

16. **Barta J., Ondrusek C.** Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine // MM Science Journal. – 2015. – P. 555–559. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_03_201504.

17. **Zhu J.** Shape Design Optimization and Comparative Analysis of a Novel Synchronous Reluctance Machine // IEEE Transactions on Magnetism. Science Journal IEEE transactions on electronics. – 2024.

18. **Суворова Е.Е., Дементьев Ю.Н., Бурлюк Л.К.** Расчет магнитных полей и индуктивных параметров синхронных реактивных двигателей // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6. – С. 112–116.

19. **Караулов В.Н., Доржинкевич А.Ф.** Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором в установившихся и переходных режимах // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 4. – С. 46–53.

References

1. Shul'ga, R.N. Sinkhronnyy reaktivnyy dvigatel' v sovremennom elektropivode [Synchronous reluctance engine in a private electric drive]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2023, no. 1, pp. 44–55. EDN JMGRWE.

2. Tikhomirov, O.I. Sinkhronnye reaktivnye elektrodvigateli dlya sozdaniya energoefektivnykh resheniy klassa IE5 [Synchronous reluctance motors for creating energy-efficient solutions of class IE5]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2022, no. 1, pp. 42–44. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.09. EDN UNYBKL.

3. Jeong, C. Performance Analysis of Dual Three-Phase Synchronous Reluctance Motor According to Winding Configuration. *Proceedings of the IEEE. Science Journal IEEE transactions on magnetics*, 2024, issue 2, pp. 99–193.

4. Fiorito, A. Rotor Optimization of a Synchronous Reluctance Machine for Railway Applications Conference. *International. Conference on Electrical Machines (ICEM) MM Science Journal*, 2024, issue 3, pp. 59–78. DOI:10.1109/ICEM60801.2024.10700068.

5. Mitrofanov, I.I. Optimal'noe po tochnosti upravlenie uglovoy skorost'yu sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya [Optimal control of the angular velocity of a synchronous jet engine in terms of accuracy]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 11-1, pp. 186–190. EDN PYURRB.

6. Ptakh, G.K. Sravnitel'naya otsenka elektricheskikh dvigateley peremennogo toka asinkhronnogo i sinkhronnogo tipov s tsel'yu primeneniya ikh v grebnykh elektroustanovkakh ledokolov bol'shoy moshchnosti

[Comparative evaluation of alternating current electric motors of asynchronous and synchronous types for the purpose of their application in rowing electrical installations of icebreakers of high power]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 24–30. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. – EDN ISPZZZ.

7. Zakharov, A.V., Malafeev, S.I., Dudulin, A.L. Synchronous reluctance motor: Design and experimental research [Synchronous reluctance motor: Design and experimental research]. *X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)* [X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)]. Novocherkassk, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.

8. Murataliyev, M., Degano, M., Di Nardo, M., Bianchi, N., Gerada, C. Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison. *Proceedings of the IEEE*, 2022, vol. 110, no. 3, pp. 382–399. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.

9. Paramonov, A.S., Kazakbaev, V.M., Oshurbekov, S.Kh., Prakht, V.A. Svrnenie energopotrebleniya asinkhronnogo i sinkhronnogo reaktivnogo dvigateley v nasosnom prilozhenii [Comparison of power consumption of asynchronous and synchronous jet engines in a pumping application]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Energo- i resursoberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyemye istochniki energii. Atomnaya energetika», posvyashchenoy pamyati prof. Danilova N.I. (1945–2015) (Danilovskie chteniya)*, Ekaterinburg, 09–13 dekabrya 2019 g. [Materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists “Energy and resource conservation. Energy supply. Unconventional and renewable energy sources. Nuclear power engineering”, dedicated to the memory of Prof. Danilov N.I. (1945–2015) (Danilovsky Readings), Ekaterinburg, December 09–13, 2019]. Ekaterinburg, 2019.

10. Han, Y., Wu, X., He, G., Hu, Y., Ni, K. Nonlinear magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, pp. 11053–11063.

11. Choi, J. -s., Ko, J. -s., Chung, D. -h. Efficiency Optimization Control of SynRM Drive. *SICE-ICASE International Joint Conference*. Busan, Korea (South), 2006, pp. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.

12. Kazakbaev, V.M., Prakht, V.A., Dmitrievskiy, V.A. Raschet rabochikh kharakteristik sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya v privode nasosa [Calculation of the performance characteristics of a synchronous jet engine

in a pump drive]. *Materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy energosberegayushchikh elektrotekhnologiy (APEET-2014)»*, Ekaterinburg, 17–20 marta 2014 g. [Proceedings of the III International Conference “Actual problems of energy-saving electrical technologies (APEET-2014)”, Ekaterinburg, March 17–20, 2014]. Ekaterinburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Ural'skiy federal'nyy universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2014, pp. 238–243. EDN VULCJB.

13. Samoseyko, V.F., Sharashkin, S.V., Gel'ver, F.A. Identifikatsiya parametrov reaktivnogo elektrodvigatelya s anizotropnoy magnitnoy provodimost'yu rotora [Identification of parameters of a reactive electric motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. EDN YTXYGX.

14. Delpoux, R., Kader, Z., Huguet, T. Observer-Based Flux Controller for Synchronous Reluctance Motor Including Magnetic Saturation. *Science Journal IEEE transactions on magnetics*, 2024, issue 1, pp. 23–85.

15. Tursini, M., Villani, M., Fabri, G., Credo, A., Parasiliti, F., Abdelli, A. Synchronous Reluctance Motor: Design, Optimization and Validation. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2018, pp. 1297–1302. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445304.

16. Barta, J., Ondrusek, C. Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine. *MM Science Journal*, 2015, pp. 555–559. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_03_201504.

17. Zhu, J. Shape Design Optimization and Comparative Analysis of a Novel Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Magnetism. Science Journal IEEE transactions on electronics*, 2024, issue 5, pp. 33–95.

18. Suvorkova, E.E., Dement'ev, Yu.N., Burul'ko, L.K. Raschet magnitnykh poley i induktivnykh parametrov sinkhronnykh reaktivnykh dvigateley [Calculation of magnetic fields and inductive parameters of synchronous jet engines]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 6, pp. 112–116.

19. Karaulov, V.N., Dorzhinkevich, A.F. Parametricheskaya model' sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya s TLA-rotorom v ustanovivshikhsya i perekhodnykh rezhimakh [Parametric model of a synchronous jet engine with a TLA rotor in steady-state and transient modes]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 4, pp. 46–53.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-52-83:656.56

Алексей Руфимович Колганов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: klgn@drive.ispu.ru .

Олег Викторович Крюков

ООО «ТСН-электро», доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru .

Сергей Евгеньевич Степанов

ООО «Газпром проектирование», кандидат технических наук, ведущий инженер отдела технологического проектирования, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 428-28-63, e-mail: stepanov55@yandex.ru .

Автоматизированное прогнозирование ресурса мощных электроприводов турбоустановок на компрессорных станциях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Прогнозирование технического состояния основных технологических установок компрессорных станций относится к приоритетным направлениям их совершенствования на основе интеллектуальных систем автоматизации. Электропривод турбокомпрессоров мощностью 4–25 МВт относится к опасным производственным объектам и, в соответствии с отраслевыми нормативно-техническими документами, подлежит непрерывному мониторингу и прогнозированию ресурса в среднесрочной перспективе. Существующие системы мониторинга технического состояния приводных электродвигателей построены по устаревшим методикам и не обеспечивают достоверный и автоматический прогноз ресурса электрических машин большой мощности. На отечественном электротехническом рынке сегодня отсутствуют надежные и адекватные технические средства и методы превентивного прогнозирования состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов, которые можно использовать для перехода к техническому обслуживанию по фактическому состоянию. В этой связи целью исследования является разработка теоретически обоснованной методологии оценки технического состояния электропривода в режиме *on-line* и автоматизированного прогнозирования его эксплуатационных параметров.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием эмпирического метода моделирования процесса старения изоляции высоковольтной обмотки статора синхронной машины, основанного на статистической обработке данных по аварийности приводов, исследовании режимов работы, влияющих на ресурс изоляции, на оценке диапазонов изменения эксплуатационных факторов и определении их корреляции с наработкой на отказ. Прогнозирование режимов работы турбоустановки и ее адаптивного функционирования осуществлено с применением эмпирических уравнений Монтзингера и метода парных сравнений Саати по наработке на отказ.

Результаты. Предложен подход интерактивного контроля технического состояния приводных машин по характеристикам частичных разрядов в изоляции электродвигателей. Разработана встроенная система мониторинга и прогнозирования режимов работы электроприводов турбоустановок, приводящих к ускоренному старению изоляции синхронных двигателей.

Выводы. Использование автоматизированных систем прогнозирования технического состояния электропривода газоперекачивающего агрегата позволяет планировать капитальные и текущие ремонты на основе фактического состояния, исключить тепловое действие токов и снизить стоимость капитальных ремонтов, контролировать работу системы охлаждения мощных машин и поддерживать оптимальные режимы, позволяющие увеличить ресурс изоляции, а также при совместном использовании данных вибрационного анализа и FFT-анализа потребления мощности точно выявлять причины повышенных уровней вибрации, что позволяет снизить общие эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, техническое обслуживание и ремонт, электропривод, мониторинг состояния синхронных двигателей, отказы изоляции

Alexey Rufimovich Kolganov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electric Drive and Industrial Installations Automation Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: klg@drive.ispu.ru

Oleg Viktorovich Kryukov

TCN-Electro LLC, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor, Deputy Director of Research, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Sergey Evgenievich Stepanov

Gazprom Design LLC, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Leading Engineer of the Technological Design Department, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 428-28-63, e-mail: stepanov55@yandex.ru

Automated forecasting of the resource of powerful electric turbine drives at compressor stations

Abstract

Background. Forecasting the technical condition of the main processing installations of compressor stations is one of the priority areas of improvement based on intellectual automation systems. The electric drive of turbochargers with a capacity of 4–25 MW is classified as hazardous production facilities. And in accordance with industry regulatory and technical documents, it is subject to continuous monitoring and resource forecasting in the medium term. The existing systems to monitor technical condition of drive electric motors are based on outdated methods and do not provide reliable and automatic forecast of the resource of high-power electric machines. The domestic electrotechnical market today lacks reliable and adequate technical means and methods of preventive forecast of the condition of electric-driven gas pumping units, which can be used to switch to maintenance according to the actual condition. In this regard, the aim of the study is to provide a theoretically sound methodology to assess the technical condition of an electric drive in *on-line* mode and automated forecast of its operational parameters.

Materials and methods. The study has been conducted using an empirical method for modeling the aging process of the insulation of the high-voltage stator winding of a synchronous machine. It is based on statistical processing of data on drive failures, a study of operating modes that affect the insulation resource, an assessment of the variation ranges of operational factors and determination of their correlation with the mean time between failures. Forecasting the operating modes of the turbine unit and its adaptive functioning has been carried out using the empirical Montzinger equations and the Saaty paired comparison method for mean time between failures.

Results. The authors have proposed an approach to interactive monitoring of the technical condition of drive machines based on the characteristics of partial discharges in the insulation of electric motors. An integrated system to monitor and forecast the operating modes of electric drives of turbo plants that lead to accelerated aging of the insulation of synchronous motors is developed.

Conclusions. The use of automated systems for predicting the technical condition of the electric drive of a gas pumping unit makes it possible to plan capital and routine repairs based on the actual condition, eliminate the thermal effect of currents and reduce the cost of capital repairs, monitor the operation of the cooling system of powerful machines and maintain optimal modes to increase insulation life. By combining vibration analysis data with FFT power consumption analysis, it is possible to identify the causes of increased vibration levels, thereby reducing overall operating costs.

Key words: compressor station, gas pumping unit, maintenance and repair, electric drive, monitoring the condition of synchronous motors, insulation failures

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.073-079

Введение. В настоящее время многочисленными нормативно-техническими документами установлены требования по оснащению оборудования магистральных газопроводов (МГ) системами мониторинга для контроля состояния, диагностирования и прогнозирования

их ресурса [1–3]. В основном это относится к прогнозу коррозионного состояния труб МГ с оценкой влияния внешних воздействий и учету электроизолирующих защитных покрытий. Однако не менее актуальным является достоверный *on-line* прогноз технического состояния основных

технологических установок компрессорных станций и площадочного оборудования [4–6].

В соответствии с Федеральным законом РФ «О промышленной безопасности», компрессорные станции (КС) МГ являются опасными производственными объектами (ОПО). Большинство газоперекачивающих агрегатов (ГПА), эксплуатируемых на КС ПАО «Газпром», выработали нормативный срок эксплуатации или близки к этому. К оборудованию ОПО с истекшим нормативным сроком эксплуатации предъявляются особые требования по контролю его технического состояния (ТС) и продлению сроков эксплуатации. В связи с этим в ПАО «Газпром» активно ведутся работы по созданию и внедрению систем мониторинга и прогнозирования ТС, интегрированных в системы автоматического управления ГПА. Такие системы развиты для газотурбинных ГПА (ГГПА) и в меньшей степени для электроприводных ГПА (ЭГПА) [7–10]. Существующие системы мониторинга и прогнозирования ТС ЭГПА построены по тем же принципам (и, как правило, теми же разработчиками), что и системы для ГГПА. В них основной акцент делается на механические узлы и элементы ЭГПА. Системы мониторинга и современные методы оценки ТС приводных синхронных электродвигателей (СД) мощностью 4–25 МВт практически отсутствуют [11–15].

Отмеченные обстоятельства определяют актуальность вопросов, связанных с развитием методов оценки показателей надежности ЭГПА, совершенствованием существующих и разработкой новых методов оценки их технического состояния с использованием независимых многокритериальных универсальных систем мониторинга [16–20]. Актуальность этих задач подтверждается их соответствием приоритетным направлениям развития науки и техники, а также основными положениям энергетической стратегии России на период до 2030 года, Программой повышения надежности работы и эффективности КС с ЭГПА и вопросами, связанными с проблемами развития энергетики ПАО «Газпром».

При этом особое внимание уделяется именно дорогостоящим мощным СД ЭГПА, требующим анализа, оценки и мониторинга показателей надежности, а также исследованию работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях, включая безопасную и эффективную эксплуатацию электротехнических комплексов и систем.

Проблема оценки показателей надежности и мониторинга состояния мощных СД, работающих в составе электротехнических комплексов, в полной мере не решена и за рубежом [21, 22]. Несмотря на особую актуаль-

ность, перечисленные задачи решаются медленно, так как процессы деградации элементов крупных электрических машин достаточно сложно поддаются точному математическому описанию и зависят от многочисленных факторов [23–25]. Кроме того, исследования надежности мощных СД связаны с необходимостью проведения натурных испытаний (в том числе, и разрушающих) на дорогостоящем действующем оборудовании.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1) выполнить обзор и критический анализ современных средств и методов оперативной диагностики и мониторинга ТС СД;

2) произвести сбор, обработку и анализ исходных данных по аварийности СД на КС эксплуатационных организаций;

3) исследовать режимы работы СД, влияющие на ресурс изоляции, с оценкой диапазонов изменения основных эксплуатационных факторов и определить их корреляции с наработкой до отказа;

4) разработать оптимальную встроенную систему мониторинга и прогнозирования (ВСМП) режимов работы ЭГПА, приводящих к ускоренному старению изоляции СД, алгоритм ее функционирования и компьютерную модель наработки до отказа.

Модель старения высоковольтной изоляции статора СД. Классификация причин отказов изоляции статоров СД приведена на рис. 1, а зависимость частоты отказов изоляции в форме диаграммы – на рис. 2.

Анализ приведенной на рис. 2 диаграммы позволяет выдвинуть гипотезу об экспоненциальном законе распределения отказов. Для обоснования данной гипотезы и определения числовых характеристик надежности выполнена статистическая обработка результатов с решением следующих задач:

- определен вид функции плотности распределения;
- вычислены параметры полученного распределения;
- с помощью критерия согласия установлена степень совпадения эмпирического распределения с теоретическим.

Распределение вероятности безотказной работы во времени и средняя наработка для экспоненциального закона распределения описываются уравнениями:

$$P(t) = \exp[-\lambda t], \quad T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda};$$

$$a(t) = \lambda \exp[-\lambda t],$$
(1)

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $a(t)$ – частота отказов; λ – интенсивность отказов; $T_{\text{ср}}$ – средняя наработка на отказ; t – интервал времени.

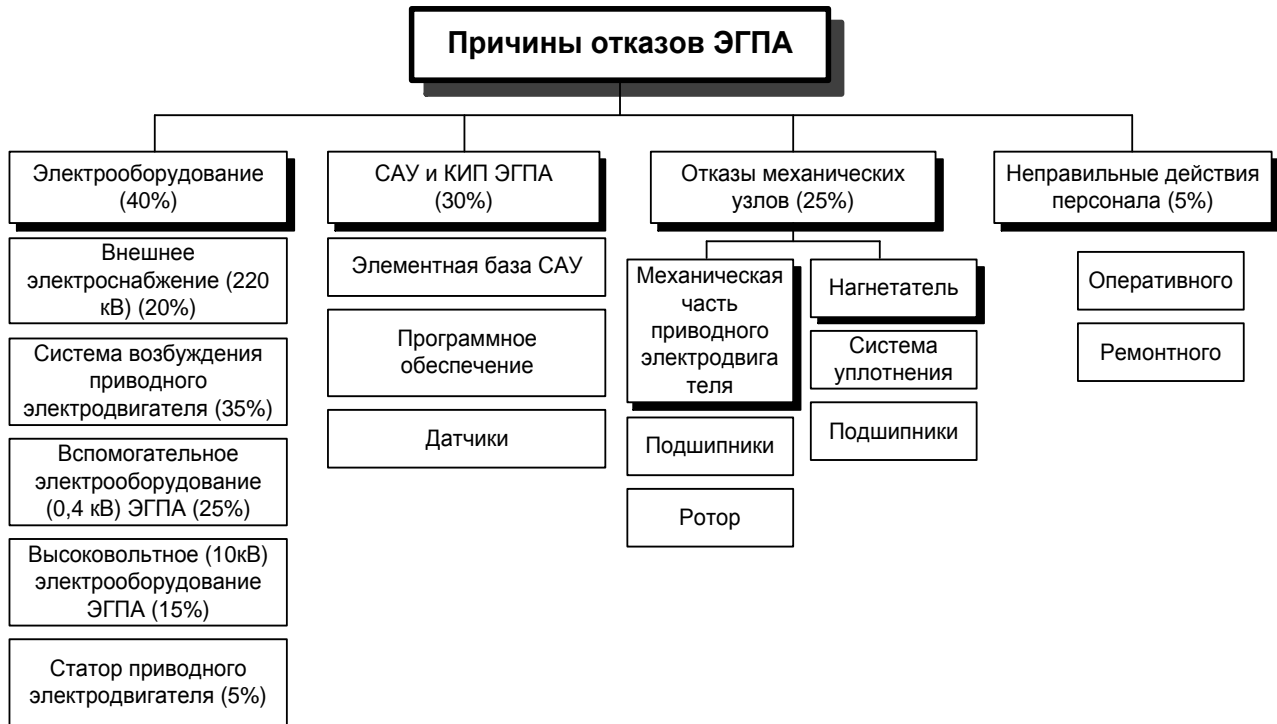


Рис. 1. Классификация причин отказов ЭГПА

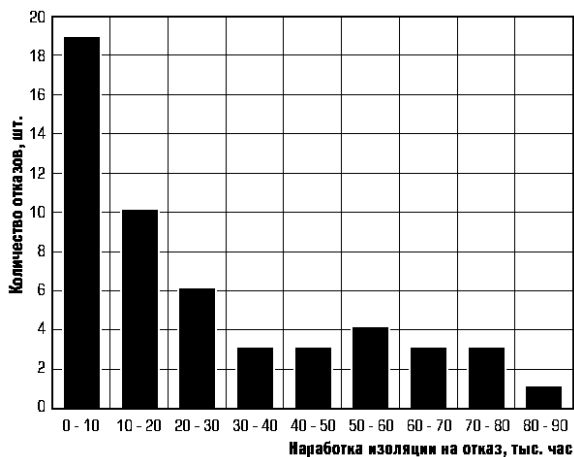


Рис. 2. Диаграмма частоты отказов изоляции статоров СД ЭГПА

При этом учитываем, что экспоненциальный закон является однопараметрическим с неизменной интенсивностью отказов $\lambda = \text{const}$ на интервале нормальных режимов эксплуатации.

Для проверки гипотезы проведем расчет согласия экспоненциального распределения с теоретическим по критерию χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{m=1}^k \frac{(h_m - N_0 p_m)^2}{N_0 p_m}, \quad (2)$$

где k – число интервалов (группы выборки); h_m , $N_0 p_m$ – эмпирическое и теоретическое значения абсолютной частоты отказов; N_0 – общее число наблюдаемых электродвигателей ЭГПА.

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Теоретические расчеты наработки электродвигателей ЭГПА

№ интервала	Граница интервала, тыс. ч	Абсолютная частота	Относительная частота	Интервальная вероятность отказа	Эмпирическая частота	Теоретическая частота	Отношение частот
k	Δt_i	h_m	$e^{-\lambda \cdot t_i}$	p_m	$N_0 \cdot p_m$	$(h_m - N_0 \cdot p_m)^2$	χ
1	0–10	19,000	1,000	0,318	16,523	6,137	0,371
2	10–20	10,000	0,682	0,217	11,273	1,620	0,144
3	20–30	6,000	0,465	0,148	7,691	2,859	0,372
4	30–40	3,000	0,318	0,101	5,247	5,050	0,962
5	40–50	3,000	0,217	0,069	3,580	0,336	0,094
6	50–60	4,000	0,148	0,047	2,442	2,426	0,993
7	60–70	3,000	0,101	0,032	1,666	1,779	1,067
8	70–80	3,000	0,069	0,022	1,137	3,471	3,053
9	80–90	1,000	0,047	0,015	0,776	0,050	0,065
	N_0, шт.	52,000				$\chi^2_{\text{расч.}}$	7,057
	$T_{\text{ср}}$, час	26.153				$\chi^2_{\text{табл.}}$	14,10
	λ	3,82E-05					

В результате расчета для доверительной вероятности нормального распределения $\beta = 0,95$ и числа степеней свободы $r = k - 2$ получено значение $\chi^2 = 7,0573$. Расчетное значение $\chi^2_{расч} < \chi^2_{табл} = 14,1$ и гипотеза об экспоненциальном распределении наработки на отказ СД не отвергается. Многочисленными исследованиями установлены зависимости старения изоляции от температуры:

- в соответствии с эмпирическими уравнениями Монтзингера, сроки службы изоляции T_1 и T_2 при различных температурах τ_1 и τ_2 связаны соотношением

$$\frac{T_1}{T_2} = 2^{\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta v}}, \quad (3)$$

где Δv – постоянная, равная изменению температуры, вызывающему сокращение срока службы изоляции данного класса в 2 раза;

- в соответствии с законом Аррениуса, процесс старения изоляции описывается на основе кинетики химических реакций:

$$k = k_{\max} \exp\left(-\frac{W_a}{RT}\right), \quad (4)$$

где k – коэффициент скорости химической реакции; W_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

В результате проведенных исследований, получены статистические данные о наиболее характерных диапазонах изменения температуры обмотки, охлаждающего воздуха в различных режимах.

На рис. 3 приведена зависимость выработки ресурса изоляции СД от среднегодовой температуры, полученная на основе уравнения Вант-Гоффа-Аррениуса:

$$\ln T_0 = \frac{B}{\theta} - G, \quad (5)$$

где T_0 – средний срок службы; θ – среднегодовая температура изоляции, К; $B = 0,99 \cdot 10^4$ К; $G = 14,33$ для микалентной изоляции.

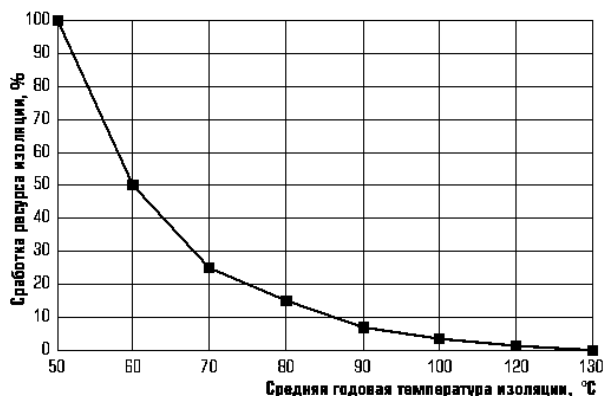


Рис. 3. Зависимость ресурса изоляции от среднегодовой температуры обмотки

Поскольку в ходе проведения исследований установлено, что отказы изоляции чаще происходят на электродвигателях, имеющих более высокую среднегодовую температуру обмотки, выражение (5) скорректировано с учетом статистического распределения среднегодовых температур обмоток статоров СД на различных КС и распределения их средней наработки на отказ.

Экспериментальное обоснование перехода на ТОиР ЭГПА по фактическому ТС СД.

Для расчета функций принадлежности СД ЭГПА используется метод парных сравнений Саати. Суть его заключается в том, что для каждой пары элементов универсального множества эксперт оценивает преимущество одного элемента над другим по отношению к свойству нечеткого множества.

На основе методики прогнозирования в программном комплексе MATLAB создана модель прогнозирования отказов изоляции СД, позволяющая вычислять значение наработки на отказ. В результате проведенных измерений частичных разрядов (ЧР) в обмотках статоров на семи ЭГПА определено текущее состояние изоляции обмоток статоров приводных электродвигателей СТД-12500-2.

Исследования показывают, что относительно высокие значения уровней ЧР обмотки статора СТД-12500-2 имеют ЭГПА №4 КЦ «Уренгой-Центр-2» и КС-25 «Починковская»

Для выявления причин повышенной разрядности обмоток при помощи программы PD-View (Iris Power) проведен детальный анализ фазового распределения частичных разрядов в обмотке электродвигателя ЭГПА №4 КЦ «Уренгой-Центр-2» и КС-25 «Починковская». За счет своевременного мониторинга ТС СД ЭГПА удалось избежать повреждения обмотки и снизить время простоя с 8760 часов до 720 часов, а также уменьшить на 2,5 млн руб. затраты на ремонт за счет замены капитального ремонта текущим.

Выводы. Рассмотренная выше методика позволяет в режиме реального времени контролировать техническое состояние приводных электродвигателей по характеристикам частичных разрядов, выявлять существенные изменения амплитуды и интенсивности последних. При увеличении показателей в 2 раза и более при идентичных параметрах работы машин выполняется анализ фазового распределения импульсов частичных разрядов, выявляется причина и делается прогноз их возникновения.

Внедрение разработанных мероприятий по мониторингу технического состояния приводных машин позволяет сократить время простоя ЭГПА в среднем до 2160 ч/год. При этом вероятность срыва планового задания, составит $R_{пз} = 0,08$, что приводит к снижению ожидаемого ущерба в 1,9 раза ($У_{пз} = 24$ млн руб./год). Внедрение разработанных методов мониторинга технического

состояния позволяет в среднем в 4 раза сократить время нахождения газоперекачивающих агрегатов в ремонте и на 30–50 % затраты на капитальный ремонт приводных машин.

Список литературы

1. Репин Д.Г. Концепты системы мониторинга технического состояния КС // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 12. – С. 30–35.
2. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, В.И. Воронков и др. – Н.Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.
3. Kryukov O., Saushev A., Shergina O., Butsanets A. Electromagnetic compatibility of multifunctional automation systems for electrical equipment using the example of electric drives // E3S Web of Conferences. "22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies, EMMFT 2020". – 2021. – Vol. 244. – P. 09007.
4. Серебряков А.В., Титов В.Г. Прогнозирование технического состояния энергетических установок // Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 60–65.
5. Ziuzev A., Metelkov V. Analysis and simulation of thermodynamic processes in high-powered AC electric motors // 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – Saint-Petersburg, 2020. – P. 9249327. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249327.
6. Serebryakov A.V. Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives // Bulletin of South Ural State University. Ser.: Power Engineering. – 2017. – Vol. 17, No. 3. – P. 102–110.
7. Васенин А.Б., Степанов С.Е. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58.
8. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – P. 516–520.
9. Babichev S.A., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81, No. 12. – P. 649–655.
10. Babichev S.A., Bychkov E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81. – P. 489–494.
11. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58.
12. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Титов В.Г. Реализация капсулированных электроприводных ГПА на объектах «Газпром» // Известия вузов. Электромеханика. – 2020. – Т. 63, № 1. – С. 31–37.
13. Крюков О.В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы синхронных электроприводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 43–46.
14. Крюков О.В. Оценка эксплуатационных факторов электроприводных ГПА по нормативным требованиям мониторинга // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 11. – С. 50–57.

15. Babichev S.A., Zakharov P.A. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72, No. 6. – P. 175–180.
16. Серебряков А.В. Универсальная система мониторинга электродвигателей ГПА // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 4(546). – С. 74–81.
17. Крюков О.В. Подход к прогнозированию технического состояния ЭГПА // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 9. – С. 30–34.
18. Леонов В.П., Федоров О.В. Применение микропроцессорной техники в нагружающих устройствах // Двигателестроение. – 1987. – № 7. – С. 37–43.
19. Крюков О.В. Автоматизированное нагружающее устройство для комплексных испытаний поршневых двигателей // Двигателестроение. – 2016. – № 2(264). – С. 30–35.
20. Макриденко Л.А., Сарычев А.П. Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики. – М.: АО «ВНИИЭМ», 2017.
21. Blagodarov D.A., Dulnev N.N. Intelligent control of electric machine drive systems // 10th ICEPDS – Conference Proceedings. – 2018. – P. 8571670.
22. Serebryakov A.V. Active and adaptive algorithms of autonomous power plants control and monitoring // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. – 2016. – P. 7911445.
23. Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 7. – P. 473–478.
24. Степанов С.Е., Васенин А.Б. Моделирование и мониторинг термодинамических процессов в синхронных электродвигателях // Контроль. Диагностика. – 2020. – № 4. – С. 28–35.
25. Valtchev S., Belousov A.S. Comparative Analysis of Electric Drives Control Systems Applied to Two-Phase Induction Motors // Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020 this link is disabled. – 2020. – P. 918–922, 9280637.

References

1. Repin, D.G. Kontsepty sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya KS [Concepts of the system for monitoring the technical condition of the compressor station]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 30–35.
2. Puzhaylo, A.F., Spiridovich, E.A., Voronkov, V.I., Kadin, V.I., Kryukov, O.V., Rubtsov, I.E., Stepanov, S.E., Titov, V.G., Papkov, B.V., Baranov, V.G., Milov, V.R., Sokolova, E.S., Bychkov, E.V., Zakharov, P.A., Mel'nikov, V.L., Babichev, S.A., Kryukov, A.O., Kiyarov, N.V., Ermolaev, A.I. *Energosberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations]. N.Novgorod: Vektor TiS, 2010. 570 p.
3. Kryukov, O., Saushev, A., Shergina, O., Butsanets, A. Electromagnetic compatibility of multifunctional automation systems for electrical equipment using the example of electric drives. *E3S Web of Conferences* «22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable

Energy Technologies, EMMFT 2020», 2021, vol. 244, p. 09007.

4. Serebryakov, A.V., Titov, V.G. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya energeticheskikh ustanovok [Forecasting the technical condition of power plants]. *Elektrotekhnika*, 2017, no. 1, pp. 60–65.

5. Ziuzev, A., Metelkov, V. Analysis and simulation of thermodynamic processes in high-powered AC electric motors. *11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS*. Saint-Petersburg, 2020. P. 9249327. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249327.

6. Serebryakov, A.V. Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 102–110.

7. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E. Metodologiya i sredstva operativnogo monitoringa elektrodvigatelay na KS [Methodology and means of operational monitoring of electric motors at compressor stations]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 50–58.

8. Kryukov, O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, pp. 516–520.

9. Babichev, S.A., Titov, V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 12, pp. 649–655.

10. Babichev, S.A., Bychkov, E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, pp. 489–494.

11. Kryukov, O.V. Monitoring usloviy ekspluatatsii elektrodvigatelay gazoperekachivayushchikh agregatov [Monitoring the operating conditions of electric motors of gas pumping units]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 50–58.

12. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E., Titov, V.G. Realizatsiya kapsulirovannykh elektroprivodnykh GPA na ob"ektakh «Gazprom» [Implementation of encapsulated electric drive GPA at Gazprom facilities]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 31–37.

13. Kryukov, O.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya raboty sinkhronnykh elektroprivodov [Built-in system for diagnostics and forecasting of synchronous electric drives]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2005, no. 6, pp. 43–46.

14. Kryukov, O.V. Otsenka ekspluatatsionnykh faktorov elektroprivodnykh GPA po normativnym trebovaniyam monitoringa [Assessment of operational factors of electric-driven gas pumping units according to regulatory monitoring requirements]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 11, pp. 50–57.

15. Babichev, S.A., Zakharov, P.A. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 6, pp. 175–180.

16. Serebryakov, A.V. Universal'naya sistema monitoringa elektrodvigatelay GPA [Universal system for monitoring GPA electric motors]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2016, no. 4(546), pp. 74–81.

17. Kryukov, O.V. Podkhod k prognozirovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya EGPA [Approach to forecasting the technical condition of EGPA]. *Priory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2016, no. 9, pp. 30–34.

18. Leonov, V.P., Fedorov, O.V. Primenenie mikroprotssornoy tekhniki v nagruzhayushchikh ustroystvakh [Application of microprocessor technology in loading devices]. *Dvigatelistroenie*, 1987, no. 7, pp. 37–43.

19. Kryukov, O.V. Avtomatizirovannoe nagruzhayushchee ustroystvo dlya kompleksnykh ispytaniy porshnevnykh dvigateley [Automated loading device for complex tests of piston engines]. *Dvigatelistroenie*, 2016, no. 2(264), pp. 30–35.

20. Makridenko, L.A., Sarychev, A.P. *Monitoring i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskikh sistem energetiki* [Monitoring and forecasting the technical condition of electromechanical power systems]. Moscow: AO «VNIIE», 2017.

21. Blagodarov, D.A., Dulnev, N.N. Intelligent control of electric machine drive systems. *10th ICEPDS – Conference Proceedings*, 2018, p. 8571670.

22. Serebryakov, A.V. Active and adaptive algorithms of autonomous power plants control and monitoring. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM*, 2016, p. 7911445.

23. Gulyaev, I.V., Teplukhov, D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no. 7, pp. 473–478.

24. Stepanov, S.E., Vasenin, A.B. Modelirovanie i monitoring termodinamicheskikh protsessov v sinkhronnykh elektrodvigatelayakh [Modeling and monitoring of thermodynamic processes in synchronous electric motors]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, no. 4, pp. 28–35.

25. Valtchev, S., Belousov, A.S. Comparative Analysis of Electric Drives Control Systems Applied to Two-Phase Induction Motors. *Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020* this link is disabled, 2020, pp. 918–922, 9280637.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.311.22

Максим Дмитриевич Фомичев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: somebody.max@yandex.ru

Владимир Павлович Жуков

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

Сергей Дмитриевич Горшенин

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

Валерий Федорович Очков

Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Москва, телефон (495) 3627171, e-mail: ochkovvf@mpei.ru

Евгений Витальевич Барочкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Учет влияния направления и скорости ветра при решении прямых и обратных задач тепломассообмена в башенных градирнях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Известны постановка и решение прямой задачи тепломассообмена в башенной градирне с учетом неравномерного распределения по поперечному сечению градирни охлаждаемой воды и охлаждающего воздуха, проанализировано влияние указанной неравномерности на эффективность охлаждения циркуляционной воды. При этом не рассмотрены возможные причины неравномерного распределения воздуха в поперечном сечении градирни. Одной из главных причин неравномерного распределения воздуха по сечению градирни являются скорость и направление ветра. Актуальным и логичным развитием исследований тепломассообмена в башенной градирне является учет и моделирование влияния направления и скорости ветра при постановке прямых и обратных задач тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭЦ и АЭС.

Материалы и методы. Исследование влияния скорости и направления ветра на распределение потоков воздуха в поперечном сечении башенной градирни выполнено с использованием пакета ANSYS Fluent. Тепломассообмен в градирне описывается на основе тепловых и материальных балансов, представленных в виде матричных уравнений. Апробация результатов работы выполнена с использованием эксплуатационных данных по башенной градирне площадью орошения 4000 м².

Результаты. Получено решение прямой задачи влияния скорости и направления ветра на неравномерность распределения потоков воздуха в поперечном сечении градирни. Показаны причины снижения эффективности охлаждения циркуляционной воды за счет указанной неравномерности. Представлены пути снижения рассматриваемой неравномерности за счет избирательного управления степенью закрытия воздушных окон (фрамуг). Сформулирована обратная задача диагностики состояния градирен.

Выводы. Предложенная методика расчета градирни, включающая оценку неравномерности подачи воздуха и оценку снижения эффективности охлаждения циркуляционной воды за счет указанной неравномерности, позволяет перейти к постановке и решению обратной задачи диагностики технического состояния системы оборотного охлаждения, включающей градирню в качестве основного элемента.

Ключевые слова: системы оборотного охлаждения воды, башенная градирня, прямая задача тепломассообмена, обратная задача диагностики, многопоточный теплообмен

Maksim Dmitriyevich Fomichev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: somebody.max@yandex.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

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

Sergei Dmitriyevich Gorshenin

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

Valeriy Fedorovich Ochkov

National Research University «MPEI», Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Moscow, telephone (495) 3627171, e-mail: ochkovvf@mpei.ru

Evgeniy Vitalyevich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Considering the influence of wind direction and speed when solving direct and inverse problems of heat and mass transfer in cooling towers

Abstract

Background. The formulation and solution of the direct problem of heat and mass transfer in a chimney cooling tower are known, considering the uneven distribution of cooled water and cooling air over the cross-section of the cooling tower. The influence of the above-noted unevenness on the efficiency of cooling the circulating water has been analyzed. At the same time, possible causes of uneven air distribution in the cross-section are not considered. One of the main causes of uneven air distribution over the cross-section is the wind speed and direction. The relevant and logical development of studies of heat and mass transfer in a chimney cooling tower is consideration and modeling the influence of wind direction and speed when formulating direct and inverse problems of heat and mass transfer in cooling towers of thermal power plants and nuclear power plants.

Materials and methods. The study of the influence of wind speed and direction on the distribution of air flow in the cross-section of a cooling tower has been carried out using the ANSYS Fluent package. Heat and mass transfer in the cooling tower is described based on heat and material balances presented in the form of matrix equations. The results of the study have been tested using operational data for a cooling tower with an irrigation area of 4000 m².

Results. The authors have obtained a solution of the direct problem of the influence of wind speed and direction on the uneven distribution of air flows in the cross section of a cooling tower. The reasons of the decline of the efficiency of cooling circulating water due to above-noted this unevenness are shown. The methods to reduce the above-noted unevenness by means of selective control of the degree of closing of air windows (transoms) are presented. An inverse problem of diagnosing the condition of cooling towers is formulated.

Conclusions. The proposed calculation method for a cooling tower, which includes an assessment of the unevenness of air supply and an assessment of the reduction of the efficiency of cooling the circulating water due to the above-noted unevenness, allows us to move on to the inverse problem of diagnosing the technical condition of the circulating cooling system, which includes a cooling tower as its main element.

Key words: water cooling systems, cooling tower, direct heat and mass transfer problem, inverse diagnostic problem, multi-flow heat exchange

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.080-085

Введение. Башенные градирни представляют собой ключевые элементы систем оборотного охлаждения (СОО), функционирование которых существенно влияет на общую эффективность выработки электроэнергии на ТЭС и АЭС [1–5]. Современные градирни работают в сложных погодных условиях, кото-

рые характеризуются температурой и влажностью наружного воздуха, а также скоростью ветра. Перечисленные факторы часто приводят к неравномерному распределению воздушных потоков в поперечном сечении градирни, что негативно сказывается на эффективности охлаждения циркуляционной воды [6–7]. Понима-

ние и моделирование указанных неравномерностей являются важным этапом в диагностике состояния градирен, корректировке их режима для повышения эффективности функционирования СОО. Известны постановка и решение прямой задачи тепломассообмена в башенной градирне с учетом неравномерного распределения по поперечному сечению градирни охлаждаемой воды и охлаждающего воздуха [6–7], в рамках которой исследовано влияние указанной неравномерности на эффективность охлаждения циркуляционной воды [7]. При этом остаются нерассмотренными возможные причины неравномерного распределения потоков воздуха в поперечном сечении. Одной из главных причин неравномерного распределения воздуха по сечению градирни является скорость и направление ветра. Актуальным и логичным направлением развития исследований тепломассообмена в башенной градирне является учет влияния направления и скорости ветра при моделировании тепломассообмена и диагностике технического состояния градирен и систем оборотного охлаждения ТЭЦ и АЭС.

Под прямыми задачами в общем случае [8] понимаются задачи, для которых заданы причины, а искомыми величинами являются следствия. Обратными будут задачи, в которых известны следствия, а неизвестными выступают причины. В обратных задачах определяющее уравнение, и/или начальные, и/или граничные условия, и/или коэффициенты не заданы полностью, но зато есть некоторая дополнительная информация [8]. В общем случае можно говорить о коэффициентных (неизвестны некоторые коэффициенты уравнения), граничных (неизвестны граничные условия) и эволюционных (не задано начальное условие) обратных задачах математической физики. Обратные задачи часто являются некорректными в классическом смысле задачами [8]. В нашем конкретном случае под прямыми задачами расчета градирен понимается определение температуры охлажденной циркуляционной воды по заданным исходным режимным параметрам теплоносителей, а под обратными задачами – диагностика возможных режимных нарушений работы при заданных параметрах теплоносителей на входе и выходе.

Методы исследования. Прямая задача влияния скорости и направления ветра на распределение воздуха в поперечном сечении башенной градирни решается с использованием пакета ANSYS Fluent¹. Для решения задачи тепломассообмена в градирне используется матричная формализация представления тепловых и материальных балансов [9].

Результаты исследования. В качестве объекта моделирования выбрана башенная градирня площадью орошения 4000 м², схематично представленная на рис. 1.

Воздух поступает в градирню через нижние окна, поднимается вверх за счет

естественной тяги, обусловленной разностью плотностей холодного и нагретого воздуха. Охлаждаемая вода, двигаясь в противоположном направлении, передает тепловую энергию воздуху за счет разности температур теплоносителей и испарения части воды. Охлажденная вода собирается в приемном бассейне, откуда циркуляционными насосами подается в конденсатор турбины.

Решение прямой задачи влияния направления и скорости ветра и температуры наружного воздуха на распределение потоков теплоносителей внутри градирни выполняется в два этапа. На первом этапе моделируется поле скоростей воздуха во внешней расчетной области снаружи градирни. Результаты моделирования на первом этапе используются для формирования граничных условий при моделировании движения воздуха внутри градирни на втором этапе решения прямой задачи. Окна градирни моделируются как внутренние интерфейсы (interior)². На внешних границах наружной области определяется условие outlet (PressureOutlet), позволяющее воздуху покидать расчетную область.

После достижения устойчивого состояния производится экспорт полей скоростей и полного давления на поверхностях окон градирни для формирования граничных условий для второго этапа. Результаты первого этапа моделирования расчетной области представлены на рис. 1 в виде линий тока воздуха снаружи градирни.

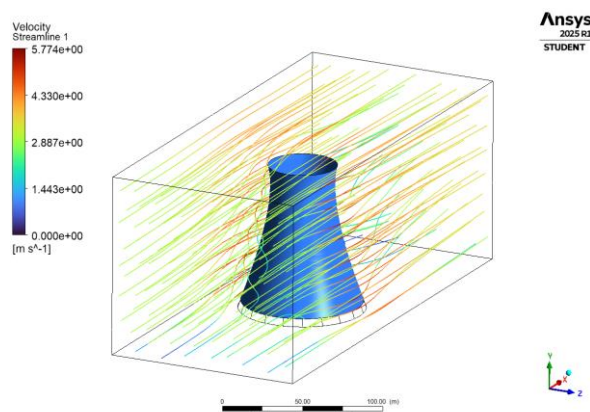


Рис. 1. Внешний вид башенной градирни и результаты первого этапа моделирования внешней расчетной области градирни в виде линий тока воздуха снаружи градирни

Моделирование внутренней области градирни производится на втором этапе для анализа неравномерности распределения воздушных потоков внутри установки. Поле давлений и скорости воздуха в окнах градирни, найденных на первом этапе, используется для задания граничных условий во внутренней модели градирни.

На втором этапе решения прямой задачи определяется распределение потоков внутри

¹ ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg. Kloppers.

² Там же.

градирни, оценка массовых расходов через выбранные области и выявляются застойные зоны. Расчетный анализ производился для скоростей ветра 1, 2, 3, 6, 9, 12 м/с. Характерные поля скорости воздуха во внутренней области градирни представлены на рис. 2 для трех скоростей ветра: 1 м/с (рис. 2,а), 3 м/с (рис. 2,в), 12 м/с (рис. 2,д). Здесь же приведены распределения расходов

воздуха по секторам поперечного сечения для тех же скоростей ветра соответственно: (рис. 2,б), (рис. 2,г), (рис. 2,е).

Для всех рассмотренных скоростей ветра результаты решения второго этапа прямой задачи в виде распределения расходов воздуха по сечению градирни представлены в таблице.

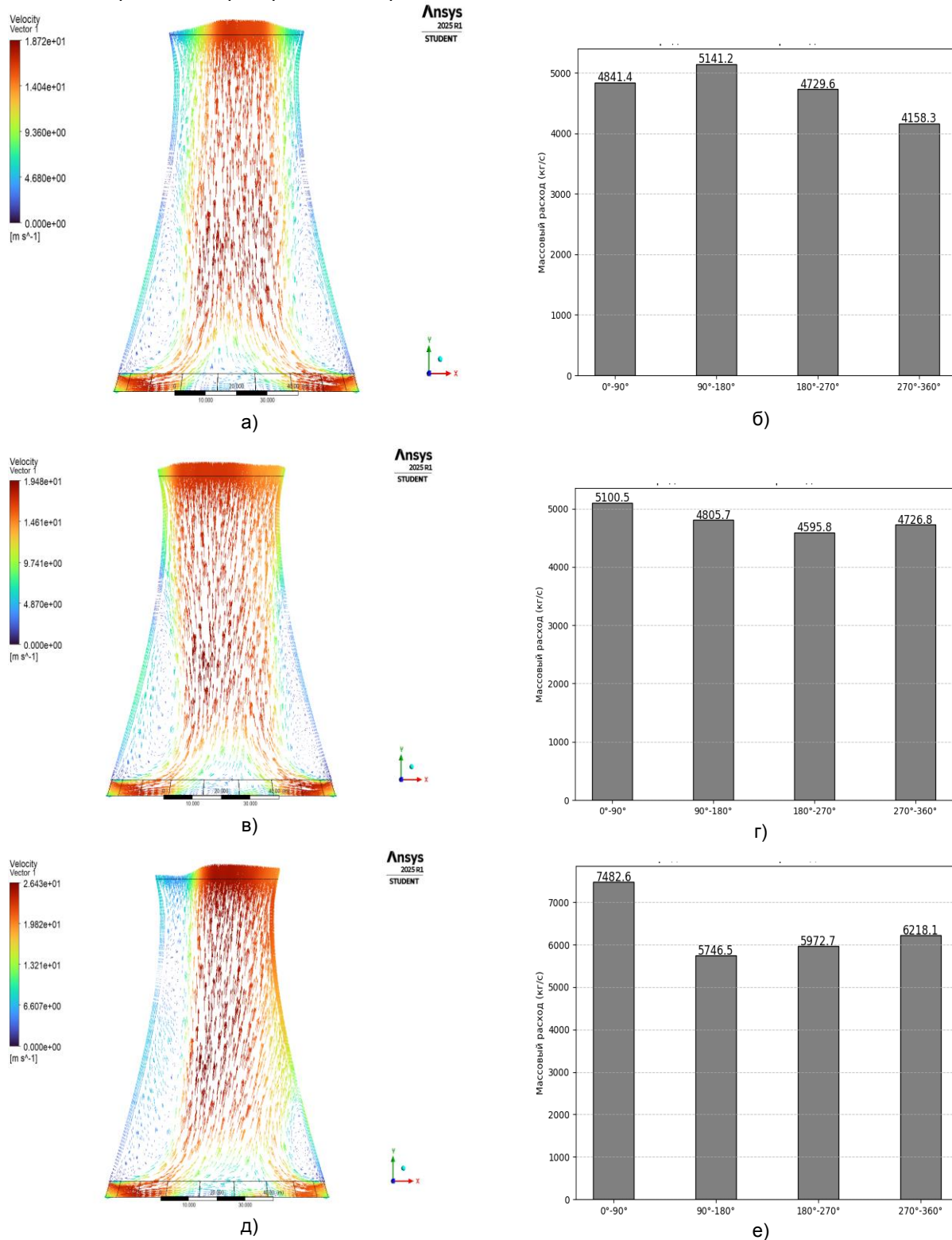


Рис. 2. Результаты решения второго этапа прямой задачи в виде полей скоростей воздуха внутри градирни (а, в, д) и распределения расходов воздуха по секторам в поперечном сечении (б, г, е) градирни при разных скоростях ветра: а, б – 1; в, г – 3; д, е – 12 м/с

Результаты решения второго этапа прямой задачи в виде распределения расходов воздуха по секторам в поперечном сечении градирни при различных скоростях ветра

Скорость ветра, м/с	Массовый расход, кг/с				Суммарный расход, кг/с
	сектор 1	сектор 2	сектор 3	сектор 4	
1	4841,3551	5141,2289	4729,5524	4158,281	18870,4
2	5035,7469	4372,4252	4919,471	4663,4834	18991,1
3	5100,5319	4805,7128	4595,7931	4726,7836	19228,8
6	5171,8503	5309,139	4888,6725	5492,8107	20862,5
9	6308,5102	5003,4566	5825,6847	5854,555	22992,2
12	7482,5753	5746,5153	5972,6528	6218,093	25419,8

Для количественной оценки неравномерности распределения потоков воздуха по сечению градирни рассчитываются дисперсия и среднее квадратичное отклонение найденного распределения [10, 11]. Зависимость среднего квадратичного отклонения от скорости ветра в виде столбчатой диаграммы представлена на рис. 3. Анализ результатов расчета показывает, что наиболее равномерное распределение, которому соответствует минимальное значение среднего квадратичного отклонения, достигается в диапазоне скоростей ветра 3–6 м/с.

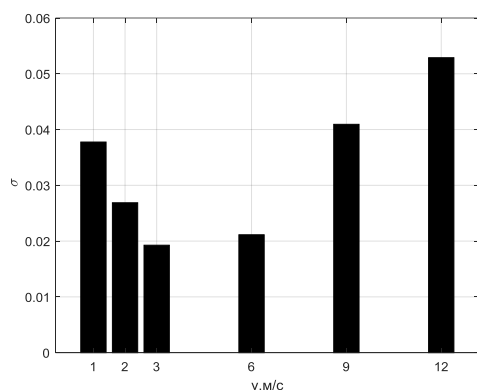


Рис. 3. Зависимость среднего квадратичного отклонения распределения расходов воздуха по поперечному сечению градирни от скорости ветра

Найденное на втором этапе решения задачи распределение воздуха по выделенным секторам поперечного сечения позволяет в рамках матричной формализации решения задачи теплообмена для градирни [7, 9] определить температуру охлажденной воды после градирни.

Полученное таким образом решение прямой задачи тепломассообмена в башенной градирне позволяет перейти к постановке и решению обратной задачи диагностики состояния системы оборотного охлаждения и башенной градирни. В общем случае системы оборотного охлаждения воды на ТЭС и АЭС включают три наиболее важные подсистемы: башенная градирня, конденсатор турбины и циркуляционный насос. При отклонении температуры циркуляционной воды от регламентируемого допустимого значения диагностировать состояние и возможные нарушения в работе необходимо для всех трех перечисленных подсистем. Указанную диагностику можно реализовать в рамках решения обратной задачи сразу для трех подсистем

или выполнять последовательно, отдельно для каждой подсистемы. Нам представляется, что поочередная диагностика трех подсистем более перспективна в силу своей простоты, однозначности и ожидаемой точности решения.

В рамках рассмотренного подхода формулируется обратная задача применительно к диагностике состояния градирни. Для демонстрации возможности постановки обратной задачи ограничимся случаем диагностики допустимой неравномерности распределения воздуха в поперечном сечении градирни. Сформулируем обратную задачу при этом следующим образом: по заданной температуре охлажденной воды, известной скорости ветра и температуре наружного воздуха диагностировать неравномерность распределения потоков воздуха по сечению градирни. Проведенные при решении прямой задачи расчеты позволяют предложить для решения обратной задачи следующий алгоритм, представленный на рис. 4.

Результаты решения прямой задачи позволяют определить температуру охлажденной воды за градирней. Ее совпадение с замеренной температурой позволяет диагностировать удовлетворительное состояние неравномерности распределения потоков воздуха по сечению градирни. При несовпадении указанных значений система диагностики сигнализирует о нарушении нормального режима работы и необходимости поиска дефектов или причин таких отклонений.

На рис. 4 представлен вариант решения обратной задачи диагностики для тестового примера определения состояния распределения потоков воздуха на основании известной скорости ветра (рис. 4,а) и известной разности температур циркуляционной воды на входе и выходе градирни при заданной скорости ветра (рис. 4,б). Совпадение неравномерности в виде среднего квадратичного отклонения на графиках показывает, что оборудование работает в штатном режиме. Существенное отличие среднего квадратичного отклонения распределений потоков воздуха на графиках рис. 4,а,б, которые показаны штриховыми линиями, свидетельствует о превышении регламентируемой неравномерности распределения расхода воздуха по секторам и о необходимости принятия мер для устранения указанной неравномерности.

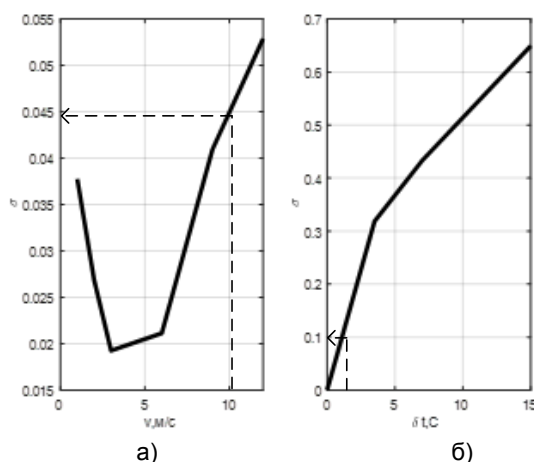


Рис. 4. Вариант численного решения обратной задачи диагностики распределения воздуха в поперечном сечении градирни: а – расчетная зависимость среднего квадратичного отклонения от скорости ветра; б – зависимость среднего квадратичного отклонения от недоохлаждения циркуляционной воды

Постановка и решение обратной задачи диагностирования в более сложных случаях, при которых диагностируется неравномерность распределения не только потоков воздуха, но и потоков циркуляционной воды по сечению, возможное загрязнение трубок конденсатора минеральными или органическими соединениями или неоптимальный угол установки лопастей циркуляционного насоса, не входят в круг задач настоящего исследования и планируются к более подробному рассмотрению при дальнейшем развитии предложенного подхода. Также планируется выполнить серию расчетов с разной степенью открытия фрамуг для выравнивания распределения потоков теплоносителей по сечению.

Выводы. В результате разработанного подхода к исследованию влияния скорости и направления ветра на распределение воздушных потоков внутри градирни и решения прямой задачи, в ходе которой определены неравномерности распределения по секторам в поперечном сечении градирни потоков воздуха при различных погодных условиях и скорости ветра, при которых наблюдается наибольшая неравномерность распределения потоков воздуха, намечены пути и разработаны рекомендации по уменьшению неравномерности воздушных потоков в поперечном сечении за счет управления степенью открытия фрамуг.

Постановка обратной задачи для случая диагностики неравномерности распределения воздуха по сечению при разных скоростях ветра позволила наметить подходы к решению задач диагностики технического состояния градирни при сочетании нескольких неисправностей в системе оборотного охлаждения.

Список литературы

1. Калатузов В.А., Павлов В.А. Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанного с работой систем циркуляционного водоснабжения // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 18–22.
2. Рыжков В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

3. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
4. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.
5. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1 / пер. с англ.; под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
6. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, В.Н. Виноградов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 3. – С. 57–63.
7. Фомичев М.Д., Жуков В.П. Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлажденной воды // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2023. – С. 392–395.
8. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009. – 480 с.
9. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2006. – 575 с.
11. Таха Х. Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

References

1. Kalatuzov, V.A., Pavlov, V.A. Raschet ogranicheniy elektricheskoy moshchnosti TETs, svyazannogo s rabotoy sistem tsirkulyatsionnogo vodosnabzheniya [Calculation of the limitations of the electric power of the CHP plant associated with the operation of circulating water supply systems]. *Elektricheskie stantsii*, 1987, no. 4, pp. 18–22.
2. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.
3. Isachenko, V.P. *TeplООbmen pri kondensatsii* [Heat exchange during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.
4. 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.
5. Martynenko, O.G. (ed.) *Spravochnik po teplООbmen-nikam. V 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers. In 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
6. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. Modelirovanie i raschet protsessа teplomassoobmena v bашennykh gradirnyakh sistem oborotnogo okhlazhdeniya TES i AES [Modeling and calculation of the heat and mass transfer process in tower-type cooling towers of CWS for thermal and nuclear power plants]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 3, pp. 57–63.
7. Fomichev, M.D., Zhukov, V.P. Raschetnyy analiz vliyaniya neravnomernosti raspredeleniya teplositeley po secheniyu gradirni na temperaturu okhlazhdennoy vody [Calculation analysis of the influence of uneven distribution of coolants over the cross-section of a cooling tower on the temperature of chilled water]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii" (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "State and prospects for the development of electrical and heat technology" (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 392–395.
8. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Chislennyye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2009. 480 p.
9. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
10. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 575 p.
11. Takha, Kh. *Vvedeniye v issledovaniye operatsiy* [Introduction to Operations Research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.

УДК: 66.011:681.51

Александр Николаевич Лабутин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики и автоматики, Россия, Иваново, e-mail: lan@isuct.ru

Анатолий Алексеевич Андреенков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 32-72-26

Елена Александровна Шуина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой высшей математики, Россия, Иваново, e-mail: HM_ISPU@mail.ru

Синергетический синтез алгоритмов управления экстремальными объектами

Авторское резюме

Состояние вопроса. Проблема синтеза алгоритмов управления нелинейными технологическими объектами, такими как химический реактор, часто обусловлена отсутствием или ограниченностью информации о динамике объекта. Вместе с тем статическая характеристика объекта по каналу регулирования задана и имеет экстремальный характер. Информация о виде статической характеристики и о структуре потоков переноса вещества в реакторе позволяет сформировать упрощенную модель, отражающую нелинейность и инерционность объекта. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов синтеза системы управления объектом с использованием упрощенной модели и исследование ее работоспособности.

Материалы и методы. Для синтеза алгоритмов управления концентрацией целевого продукта в химическом реакторе использован метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов с применением нелинейной модели статистики объекта и линейной модели, характеризующей инерционность. Проблема наличия точки экстремума на статической характеристике решена введением кусочно-постоянной функции в алгоритмы управления.

Результаты. Синтезированы три алгоритма управления, отличающиеся наличием интегральной составляющей и структурой. Показана работоспособность всех трех алгоритмов. Решена задача синтеза алгоритмов управления экстремальным нелинейным объектом – жидкофазным химическим реактором с последовательно-параллельной реакцией – при отсутствии полной математической модели объекта и наличии только экстремальной статической характеристики по каналу регулирования.

Выводы. Предложенный оригинальный подход к синтезу САУ экстремальными объектами (на примере химического реактора), предусматривающий формирование упрощенной динамической модели объекта и аналитический синтез алгоритмов управления методами АКАР, показал работоспособность САУ. Предложенный способ синтеза рекомендуется для решения задач разработки САУ аналогичными объектами различной физической природы при ограниченной информации о динамике объекта.

Ключевые слова: экстремальный объект, химический реактор, статическая характеристика объекта управления, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, нелинейный алгоритм управления, инерционное звено, кусочно-постоянная функция

Alexander Nikolaevich Labutin

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Technical Cybernetics and Automation Department, Russia, Ivanovo, e-mail: lan@isuct.ru

Anatoly Alekseevich Andreenkov

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 32-72-26

Elena Alexandrovna Shuina

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of Higher Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: HM_ISPU@mail.ru

Synergetic synthesis of control algorithms for extreme objects

Abstract

Background. Due to the absence or limited information about the dynamics of the object, the problem of synthesizing control algorithms of nonlinear technological objects, such as a chemical reactor occurs. At the same time, the static characteristic of the object in the control channel is given and has an extreme nature. Information about the form of the static characteristic and the structure of substance transfer flows in the reactor makes it possible to develop a simplified model that reflects the nonlinearity and inertia of the object. Thus, it is necessary to develop methods of synthesizing a control system using a simplified model and to study its performance.

Materials and methods. To synthesize algorithms for controlling the concentration of the target product in a chemical reactor, the authors have used Analytical Design of Aggregated Regulators method, applying a nonlinear static model of the object and a linear model characterizing the inertia. The issue of the extremum point on the static characteristic has been addressed by introducing a piecewise-constant function into the control algorithms.

Results. Three control algorithms have been synthesized. They differ in having an integral component and structure. The performance of all three algorithms has been demonstrated. The authors have synthesized control algorithms for an extreme nonlinear system – a liquid-phase chemical reactor with a consecutive-parallel reaction. The problem has been addressed under conditions of incomplete mathematical modeling and the availability of only an extreme static characteristic in the control channel.

Conclusions. An unconventional approach to the synthesis of control systems for extreme objects (using a chemical reactor as an example) has been proposed. It provides a simplified dynamic model of the object and analytical synthesis of control algorithms using Analytical Design of Aggregated Regulators method. The performance of control system is shown. The proposed synthesis method is recommended to solve problems of control systems development for similar objects of different physical nature with limited information on the dynamics of the object.

Key words: extreme system, chemical reactor, control object static characteristic, Analytical Design of Aggregated Regulators, nonlinear control algorithm, inertial element, piecewise-constant function

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.086-092

Введение. Как правило, технические и технологические объекты управления (ТОУ) являются нелинейными. Проблема синтеза систем автоматического управления (САУ) такими объектами решается в настоящее время с использованием двух основных подходов.

Первый предполагает линеаризацию исходной модели в окрестности рабочей точки и синтез одноканальных или многоканальных систем управления (СУ) на базе регулятора состояния методами модального управления [1]. При этом основное внимание уделяется обеспечению робастности СУ [1–3].

Второй подход предполагает синтез САУ с использованием исходной нелинейной многомерной модели объекта. Анализ состояния современной прикладной теории управления показывает, что в общем виде данная проблема не решена [4–7]. Необходимо отметить существенный прогресс в развитии современной прикладной теории управления, обусловленный созданием и развитием синергетической теории управления [8, 9], методология которой изначально ориентирована на синтез САУ нелинейными, многосвязными, многомерными объектами методами аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [10–14].

Большой (особый) класс образуют нелинейные объекты, статическая характеристика которых по каналу управлению имеет немонотонный экстремальный характер, так называемые экстремальные объекты [15, 16]. Как правило, рабочая точка объекта расположена в малой окрестности точки экстремума, так как ее положение определяется в результате решения задачи оптимизации процесса функционирования объекта.

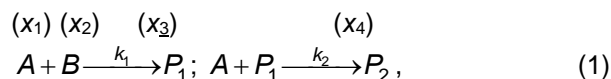
В литературе практически отсутствуют работы, посвященные синтезу СУ экстремальными объектами, за исключением систем адаптивного экстремального регулирования (СЭР) [15–17]. При синтезе СЭР инерционностью объекта управления пренебрегают, используется модель в форме уравнений безынерционного экстремального нелинейного звена [15–17].

Примером экстремального объекта является химический реактор, целью функционирования которого является обеспечение максимального значения концентрации (выхода) целевого продукта или минимального значения концентрации побочного продукта [18].

Не редка ситуация, когда статическая характеристика и рабочая точка на ней определяются экспериментальным способом при отсутствии полной математической модели объекта.

Исходя из цели функционирования реактора, основной задачей СУ является задача управления концентрацией целевого продукта реакции.

Постановка задачи. Объектом управления является жидкофазный химический реактор емкостного типа, в котором реализуется последовательно-параллельная реакция:



где P_1 – целевой продукт реакции; x_i – концентрации соответствующих компонентов; A , B – исходные реагенты, которые подаются в реактор отдельными потоками с расходами v_1 и v_2 соответственно; $k_i = k_{i0} \exp(-E_i / (R(273 + t)))$, $i = 1, 2$, – температурная зависимость констант скоростей; E_i – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; t – температура смеси в реакторе.

Экспериментальным способом были определены режимно-технологические параметры объекта, обеспечивающие максимальное значение концентрации x_3 при заданной нагрузке по реагенту A и фиксированной температуре. Статическая характеристика по каналу регулирования $\Delta v_2 \rightarrow x_3$ представлена на рис. 1.

Ставится задача синтеза алгоритма управления концентрацией x_3 методом АКАР при следующих условиях: отсутствует полная математическая модель динамики объекта, измеряется в реальном времени только x_3 ; заданы статическая характеристика объекта по каналу управления и уравнение исполнительного механизма:

$$\hat{x}_3 = f(\Delta v_2);$$

$$T_{\text{ИМ}} \frac{d\Delta v_2}{d\tau} = -\Delta v_2 + k_{\text{ИМ}} u, \quad (2)$$

где u – управляющий сигнал контроллера; $T_{\text{ИМ}}$, $k_{\text{ИМ}}$ – постоянная времени и коэффициент передачи исполнительного механизма.

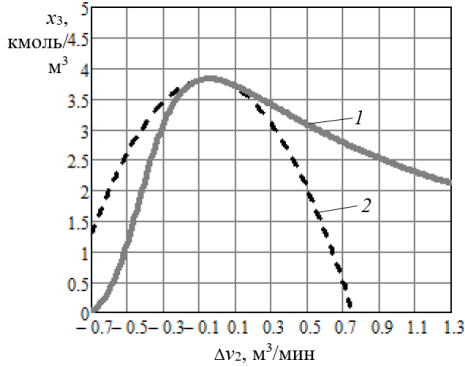


Рис. 1. Статическая характеристика объекта по каналу управления: 1 – полученная экспериментально; 2 – аппроксимация квадратичной зависимостью

Синтез алгоритма управления. Аппроксимируем статическую характеристику в окрестности рабочей точки квадратичной зависимостью

$$\hat{x}_3 = f(\Delta v_2) = a_0 + a_1 \Delta v_2 + a_2 \Delta v_2^2, \quad (3)$$

где $a_0 = 3,808$; $a_1 = -0,57$; $a_2 = -5,96$.

Соотношение (3) – это, по существу, нелинейная модель статики по каналу регулирования. Скорость изменения регулируемой переменной в окрестности статической характеристики будет иметь вид

$$\frac{d\hat{x}_3}{d\tau} = (a_1 + 2a_2 \Delta v_2) \frac{d\Delta v_2}{d\tau}.$$

Однако это уравнение не характеризует инерционность объекта. Предлагается представить объект по каналу регулирования в виде последовательного соединения двух звеньев: статического звена с нелинейной характеристикой, которая позволяет определить значение концентрации \hat{x}_3 при заданном значении регулирующего воздействия Δv_2 в установившемся режиме, и линейного звена, характеризующего инерционность объекта. В предположении, что в реакторе реализуется режим идеального перемешивания жидкости, инерционность процесса изменения концентрации x_3 предлагается характеризовать аperiодическим звеном первого порядка:

$$T_{\text{об}} \frac{dx_3}{d\tau} + x_3 = \hat{x}_3, \quad (4)$$

где $T_{\text{об}} = V / (v_1 + v_2)$ – постоянная времени звена; V – объем реактора; $(v_1 + v_2)$ – расходы потоков в статике.

Описанный прием разработки нелинейной модели объекта управления успешно применялся в [19] при синтезе СУ процессом экстракции фосфорной кислоты. Структура математической модели объекта представлена на рис. 2.

Полная модель объекта управления имеет следующий вид:

$$\frac{d\Delta v_2}{d\tau} = \frac{1}{T_{\text{ИМ}}} (-\Delta v_2 + k_{\text{ИМ}} u);$$

$$\hat{x}_3 = f(\Delta v_2) = a_0 + a_1 \Delta v_2 + a_2 \Delta v_2^2; \quad (4)$$

$$\frac{dx_3}{d\tau} = \frac{1}{T_{\text{об}}} (-x_3 + \hat{x}_3).$$

Синтез алгоритма управления нелинейным объектом (4) предлагается проводить методом АКАР с использованием процедуры последовательного введения в рассмотрение совокупности инвариантных многообразий [8, 9]. Поскольку канал управления задан (рис. 2), будем использовать «обратную» последовательность инвариантных многообразий (ИМ).

На первом этапе необходимо определить внутреннее управление $\hat{x}_3 = \bar{x}_3$, обеспечивающее технологическое требование к системе управления ($x_3 = \bar{x}_3$), где \bar{x}_3 – заданное значение концентрации. ИМ зададим в виде

$$\psi_1 = (x_3 - \bar{x}_3) = 0. \quad (5)$$

Записав основное функциональное уравнение (ОФУ) $T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$ в развернутом виде, в силу третьего уравнения из (4) получим

$$\bar{\dot{x}}_3 = x_3 - \frac{T_{\text{об}}}{T_1} (x_3 - \bar{x}_3), \quad (6)$$

где $T_1 > 0$ – настроечный параметр.

На втором этапе необходимо определить внешнее управление u , обеспечивающее равенство $\hat{x}_3 = \bar{x}_3$. Сформируем ИМ в форме

$$\psi_2 = (\hat{x}_3 - \bar{x}_3) = 0. \quad (7)$$

ОФУ $T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$ в развернутом виде в силу первых двух уравнений модели (4) примет вид

$$\dot{\hat{x}}_3 = -\frac{1}{T_2} (\hat{x}_3 - \bar{x}_3), \text{ т.е.}$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_3 &= \frac{\partial f}{\partial \Delta v_2} \Delta \dot{v}_2 = \frac{\partial f}{\partial \Delta v_2} \left[\frac{1}{T_{\text{ИМ}}} (-\Delta v_2 + k_{\text{ИМ}} u) \right] = \\ &= -\frac{1}{T_2} (\hat{x}_3 - \bar{x}_3). \end{aligned}$$

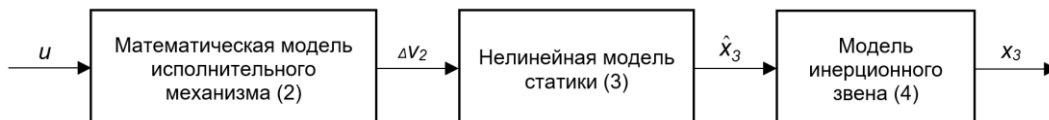


Рис. 2. Структура модели объекта управления

Из данного соотношения с учетом (3) получим

$$k_{\text{ИМ}}u = \Delta v_2 - \frac{T_{\text{ИМ}}}{T_2(a_1 + 2a_2\Delta v_2)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + \frac{T_{\text{об}}}{T_1} (x_3 - \bar{x}_3) \right], \quad \hat{x}_3 = a_0 + a_1\Delta v_2 + a_2\Delta v_2^2, \quad (8)$$

где $T_1 > 0$, $T_2 > 0$ – настроечные параметры.

Для повышения точности работы СУ в статике необходимо ввести в алгоритм интегральную составляющую от ошибки регулирования. Для этого на первом этапе синтеза ИМ задается в виде $\psi_1 = (x_3 - \bar{x}_3) + z = 0$, где $\dot{z} = x_3 - \bar{x}_3$. Выражение для астатического алгоритма примет вид

$$k_{\text{ИМ}}u = \Delta v_2 - \frac{T_{\text{ИМ}}}{T_2(a_1 + 2a_2\Delta v_2)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + T_{\text{об}}(K_{\text{П}}(x_3 - \bar{x}_3) + K_{\text{И}}z) \right], \quad (9)$$

где $K_{\text{П}} = \frac{1}{T_1} + \gamma$, $K_{\text{И}} = \frac{\gamma}{T_1}$.

В знаменателе уравнений (8) и (9) присутствует производная $dx_3/d\Delta v_2$, которая равна нулю в точке экстремума статической характеристики $\{\Delta v_2^*, x_{3\text{max}}\}$. Алгоритм становится неработоспособным.

Для решения проблемы предлагается использовать в алгоритме кусочно-постоянную функцию, имеющую точку разрыва первого рода, например точку скачка в окрестности значения $\Delta v_2 = \Delta v_2^*$:

$$\delta = \frac{\Delta v_2 - \Delta v_2^*}{|\Delta v_2 - \Delta v_2^*|}.$$

Моделирование системы управления.

Для оценки работоспособности СУ путем моделирования была создана математическая модель химического реактора, в котором реализуется реакция (1). При заданной нагрузке на аппарат по исходному реагенту А (v_1 , $C_{\text{АВХ}}$), заданной температуре были определены режимно-технологические параметры процесса.

Математическая модель возбужденного движения химической подсистемы имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= \frac{1}{V} \left[v_1 C_{\text{АВХ}} - (v_1 + v_2^0)x_1 + V(-k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3) \right] - \frac{x_1}{V} \Delta v_2; \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= \frac{1}{V} \left[v_2 C_{\text{ВВХ}} - (v_1 + v_2^0)x_2 + V(-k_1x_1x_2) \right] + \frac{C_{\text{ВВХ}} - x_2}{V} \Delta v_2; \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= f_3(\cdot) = \frac{1}{V} \left[-(v_1 + v_2^0)x_3 + V(k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3) \right] - \frac{x_3}{V} \Delta v_2; \\ \frac{d\Delta v_2}{d\tau} &= \frac{1}{T_{\text{ИМ}}} (k_{\text{ИМ}}u - \Delta v_2), \end{aligned} \quad (10)$$

где $C_{\text{АВХ}}$, $C_{\text{ВВХ}}$ – концентрации исходных компонентов во входных потоках.

Значения режимно-технологических и конструктивных параметров процесса в стационарном установившемся режиме функционирования объекта (в изотермическом режиме при температуре $t = 80^\circ\text{C}$) следующие: $V = 10 \text{ м}^3$; $v_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{мин}$; $v_2 = 0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$; $C_{\text{АВХ}} = 20 \text{ кмоль/м}^3$; $C_{\text{ВВХ}} = 10 \text{ кмоль/м}^3$; $k_{10} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{мин})$; $k_{20} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{мин})$; $E_i = 66520 \text{ кДж/кмоль}$; $x_1^0 = 0,829 \text{ кмоль/м}^3$; $x_2^0 = 2,51 \text{ кмоль/м}^3$; $x_3^0 = 3,808 \text{ кмоль/м}^3$, значения настроечных параметров – $K_{\text{П}} = 0,6$; $K_{\text{И}} = 0,09$; $T_1 = 0,2$; $T_{\text{ИМ}} = 0,2$; $k_{\text{ИМ}} = 1$; $T_2 = 1,67$.

В целях проведения сравнительного анализа получен алгоритм управления (13) с использованием последовательной совокупности ИМ $\psi_1 = \Delta v_2 + v(x_3) = 0$, $\psi_2 = x_3 - \bar{x}_3 + \gamma z$ и модели объекта (10), а также ОФУ в виде $T\dot{\psi}_i + \psi_i = 0$. В полученном алгоритме принято упрощение $\dot{v}(x_3) = 0$, введена δ -функция.

Модифицированные алгоритмы управления с использованием кусочно-постоянной функции δ будут выглядеть следующим образом:

$$k_{\text{ИМ}}u = \Delta v_2 - \delta \frac{T_{\text{ИМ}}}{T_2(a_1 + 2a_2|\Delta v_2|)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + K_{\text{П}}T_{\text{об}}(x_3 - \bar{x}_3) \right], \quad (11)$$

$$k_{\text{ИМ}}u = \Delta v_2 - \delta \frac{T_{\text{ИМ}}}{T_2(a_1 + 2a_2|\Delta v_2|)} \left[(\hat{x}_3 - x_3) + T_{\text{об}}(K_{\text{П}}(x_3 - \bar{x}_3) + K_{\text{И}}z) \right], \quad (12)$$

$$k_{\text{ИМ}}u = \Delta v_2 - \frac{T_{\text{ИМ}}}{T_1} \left(\Delta v_2 - \frac{1}{d_3} \left[-\delta(K_{\text{П}}(x_3 - \bar{x}_3) + K_{\text{И}}z) - f_3(x_3) \right] \right). \quad (13)$$

Анализ работоспособности проведен путем моделирования системы управления с использованием модели объекта (10). Предполагается возможность измерения только концентрации x_3 и расхода v_2 .

На всех представленных ниже графиках (рис. 3–6) показаны результаты, полученные с применением δ в алгоритмах (11), (12) и (13).

На рис. 3 процесс управления устойчивый, но так как заданное значение $\bar{x}_3 = x_3^0 + 0,1x_3^0$ превышает возможное (см. рис. 1), алгоритмы не изменяют значение v_2 после достижения точки экстремума статической характеристики. Задание \bar{x}_3 недостижимо при существующих параметрах модели. Аналогичная ситуация – при уменьшении $C_{\text{АВХ}}$ (рис. 6), $C_{\text{ВВХ}}$, v_1 , t . Таким образом, в указанных случаях наличие δ -функции в алгоритмах обеспечивает устойчивый процесс управления и наименьшую статическую ошибку.

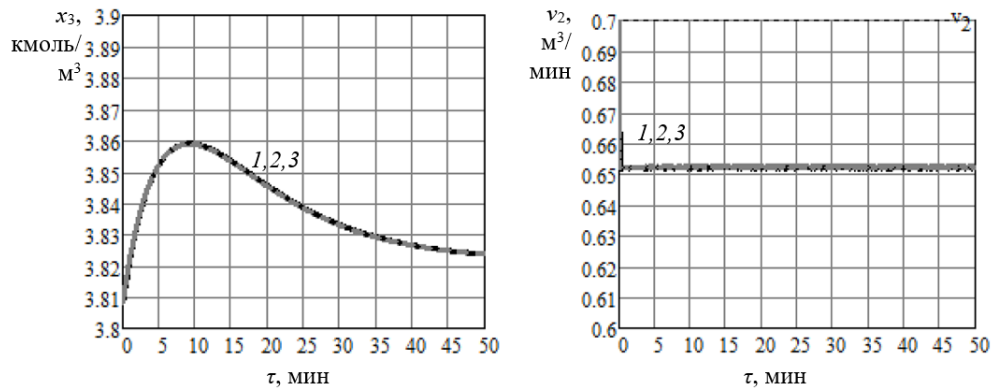


Рис. 3. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta \bar{x}_3 = 0,1 \bar{x}_3^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)

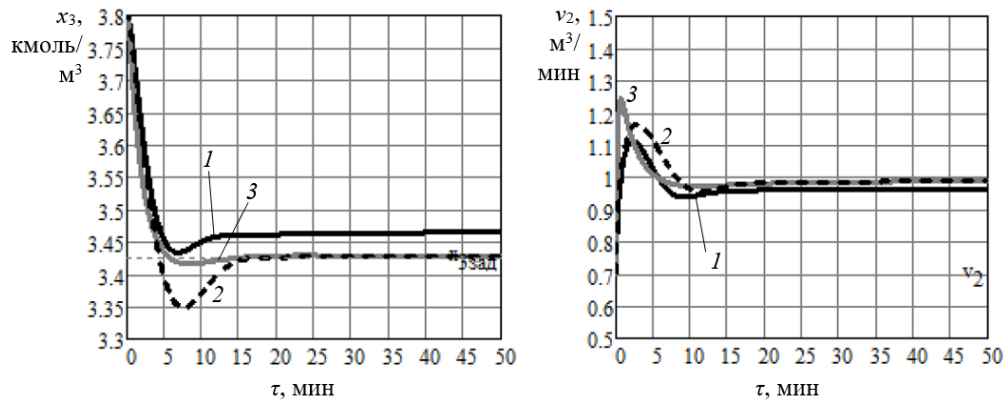


Рис. 4. Переходные процессы управления при изменении задания $\Delta \bar{x}_3 = -0,1 \bar{x}_3^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)

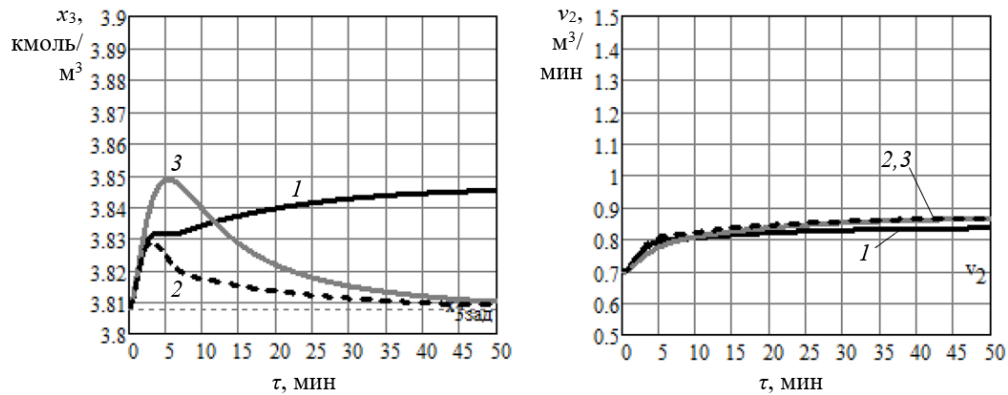


Рис. 5. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации $\Delta C_{\text{Авх}} = 0,1 C_{\text{Авх}}^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)

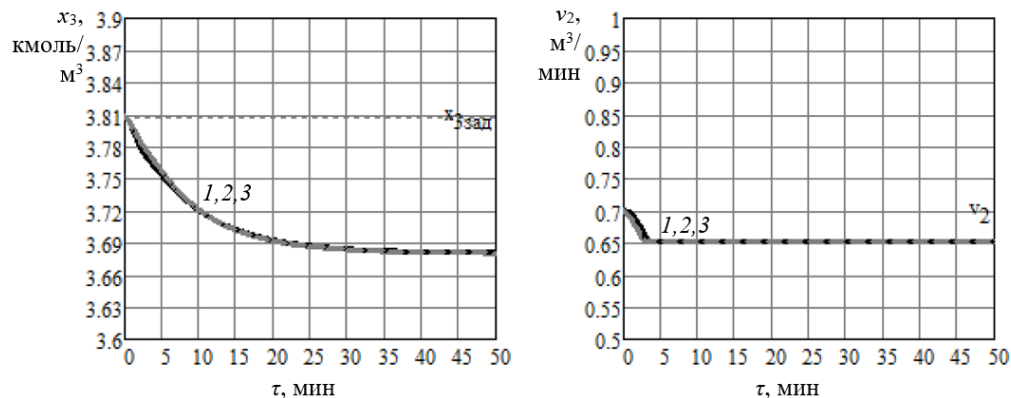


Рис. 6. Переходные процессы управления при ступенчатом изменении входной концентрации $\Delta C_{\text{Авх}} = -0,1 C_{\text{Авх}}^0$; 1, 2, 3 – алгоритмы (11), (12), (13)

При уменьшении задания $\Delta \bar{x}_3 = -0,1 \bar{x}_3^0$ (рис. 4) или увеличении $C_{\text{двх}}$ (рис. 5) система управления обеспечивает равенство $x_3 = \bar{x}_3$. Все алгоритмы показали работоспособность, статическая ошибка при этом отсутствует.

Выводы. Предложенный оригинальный подход к синтезу САУ экстремальными объектами (на примере химического реактора), предусматривающий формирование упрощенной динамической модели объекта и аналитический синтез алгоритмов управления методами АКАР, путем компьютерного моделирования СУ с использованием полной модели объекта показал работоспособность САУ, что позволяет рекомендовать предложенный способ синтеза для решения задач разработки САУ аналогичными объектами различной физической природы при ограниченной информации о динамике объекта.

Список литературы

1. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Новые структурные решения в области систем модального управления // Известия ТРТУ. – 2004. – № 2(37). – С. 102–111.
2. Тютиков В.В., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В. Условия параметрической грубости САУ с регуляторами состояния // Известия ТРТУ. – 2005. – № 1(45). – С. 53–62.
3. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.
4. Красовский А.А. Развитие и становление современной теории управления // Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – С. 13–34.
5. Колесников А.А. Проблемы теории аналитического конструирования нелинейных регуляторов // Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – С. 35–129.
6. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебник и практикум для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2021. – 441 с.
7. Филиповский В.М. Системы управления в пространстве состояний: учеб. пособие. – СПб., 2022. – 75 с.
8. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ; М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
9. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: МЭИ, 2016. – 280 с.
10. Веселов Г.Е., Сеницын А.С. Синтез системы управления адаптивной подвеской с учетом физических ограничений амортизатора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7(168). – С. 170–181.
11. Колесников А.А., Кузьменко А.А. Нелинейный синтез законов управления турбогенератором: интегральная адаптация // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 84–89.
12. Кузьменко А.А., Сеницын А.С., Сеницына А.А. Адаптивное управление энергоустановкой с

нелинейным наблюдателем состояния // Информатика и системы управления. – 2016. – № 4. – С. 103–114.

13. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Аналитический синтез системы управления химическим реактором // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 3. – С. 318–322.

14. Робастное управление концентрацией целевого продукта в химическом реакторе / А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын, В.А. Зайцев, Г.В. Волкова // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61, вып. 12. – С. 130–136.

15. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1989. – 263 с.

16. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

17. Растринин Л.А. Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1974. – 270 с.

18. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Анализ и оптимальный синтез химического реактора как объекта управления // Химическая промышленность. – 2018. – Т. 95, № 5. – С. 241–248.

19. Математическая модель процесса экстракции и фильтрации производства фосфорной кислоты / В.А. Кривоносов, В.А. Бабенков, В.В. Соколов и др. // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 7. – С. 24–29.

References

1. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. Novye strukturnye resheniya v oblasti sistem modal'nogo upravleniya [New Structural Solutions in Modal Control Systems]. *Izvestiya TRTU*, 2004, no. 2(37), pp. 102–111.
2. Tyutikov, V.V., Kotov, D.G., Tararykin, S.V. Usloviya parametricheskoy grubosti SAU s regulatorami sostoyaniya [Conditions of Parametric Robustness for Automatic Control Systems with State Regulators]. *Izvestiya TRTU*, 2005, no. 1(45), pp. 53–62.
3. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob"ektami* [Robust Modal Control of Technological Objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.
4. Krasovskiy, A.A. Razvitie i stanovlenie sovremennoy teorii upravleniya [Development and Formation of Modern Control Theory]. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and Problems of Control Theory]. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 13–34.
5. Kolesnikov, A.A. Problemy teorii analiticheskogo konstruirovaniya nelineynykh regulatorov [Problems of the Theory of Analytical Design of Nonlinear Regulators]. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and Problems of Control Theory]. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 35–129.
6. Kim, D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Mnogomernye, nelineynye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Theory of Automatic Control. Multidimensional, Nonlinear, Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2021. 441 p.
7. Filipovskiy, V.M. *Sistemy upravleniya v prostanstve sostoyaniy* [Control Systems in State Space]. Saint-Petersburg, 2022. 75 p.
8. Kolesnikov, A.A. *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* [Synergetic Theory of Control]. Taganrog: TRTU; Moscow: Energoatomizdat, 1994. 344 p.
9. Kolesnikov, A.A., Veselov, G.E., Kuz'menko, A.A. *Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem*

upravleniya protsessami generirovaniya elektroenergii [New Technologies for Designing Modern Control Systems for Electricity Generation Processes]. Moscow: MPEI, 2016. 280 p.

10. Veselov, G.E., Sinitsyn, A.S. Sintez sistemy upravleniya adaptivnoy podveskoy s uchetom fizicheskikh ogranicheniy amortizatora [Synthesis of an Adaptive Suspension Control System Considering Physical Constraints of a Damper]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 7(168), pp. 170–181.

11. Kolesnikov, A.A., Kuz'menko, A.A. Nelineyny sintez zakonov upravleniya turbogeneratorom: integral'naya adaptatsiya [Nonlinear Synthesis of Turbo Generator Control Laws: Integral Adaptation]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2012, no. 5, pp. 84–89.

12. Kuz'menko, A.A., Sinitsyn, A.S., Sinitsyna, A.A. Adaptivnoe upravlenie energoustanovkoy s nelineynym nablyudatelem sostoyaniya [Adaptive Control of a Power Plant with a Nonlinear State Observer]. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2016, no. 4, pp. 103–114.

13. Labutin, A.N., Nevinit syn, V.Yu. Analiticheskiy sintez sistemy upravleniya khimicheskim reaktorom [Analytical Synthesis of a Chemical Reactor Control System]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 318–322.

14. Labutin, A.N., Nevinit syn, V.Yu., Zaytsev, V.A., Volkova, G.V. Robastnoe upravlenie kontsentratsiey tsel-evogo produkta v khimicheskom reaktore [Robust Control of Target Product Concentration in a Chemical Reactor]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2018, vol. 61, issue 12, pp. 130–136.

15. Aleksandrov, A.G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989. 263 p.

16. Churakov, E.P. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 256 p.

17. Rastrigin, L.A. *Sistemy ekstremal'nogo upravleniya* [Extremal Control Systems]. Moscow: Nauka, 1974. 270 p.

18. Labutin, A.N., Nevinit syn, V.Yu., Volkova, G.V. Analiz i optimal'nyy sintez khimicheskogo reaktora kak ob"ekta upravleniya [Analysis and Optimal Synthesis of a Chemical Reactor as a Control Object]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2018, vol. 95, no. 5, pp. 241–248.

19. Krivonosov, V.A., Babenkov, V.A., Sokolov, V.V., Shibanov, E.Yu., Perekrestov, V.P. Matematicheskaya model' protsessa ekstraksii i fil'tratsii proizvodstva fosfor-noy kisloty [Mathematical Model of the Extraction and Fil-tration Process in Phosphoric Acid Production]. *Avtomati-zatsiya v promyshlennosti*, 2013, no. 7, pp. 24–29.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 3

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 16.06.2025. Выход в свет 30.06.2025. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 11,35. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8