



Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

Вып. 4 /2020

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

Над номером работали:

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

Начальник УИУНЛ
Технический редактор
Редактор

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

М.В. Козлова, П.С. Соколов, А.В. Банников. Исследование влияния реальных физических свойств влажного воздуха на точность расчета тепломассообменных процессов....**5**

А.Б. Ларин, В.В. Козловский, М.П. Савинов. Методика исследования качества конденсата пара и охлаждающей воды конденсатора паровой турбины..... **14**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

О.С. Мельникова, М.В. Прусаков, А.А. Жолобов. Исследование влияния волокон целлюлозы на электрическую прочность трансформаторного масла..... **23**

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин, Г.Н. Рощин. Разработка и практическая реализация методов автоматической настройки цифровых управляющих устройств мехатронных систем..... **34**

А.А. Николаев, М.В. Буланов, К.А. Шахбиева. Разработка адаптивного алгоритма ШИМ активного выпрямителя и способа диагностики резонансных явлений во внутри-заводских сетях..... **44**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, М.С. Шумилова,
Е.В. Барочкин, А.Н. Беляков.** Оптимизация
структуры и режима работы сложных тепло-

массообменных систем с многокомпонентны-
ми теплоносителями.....**55**

В.А. Наумов. Анализ нестационарной матема-
тической модели простой гидравлической сети
с центробежным насосом.....**64**

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

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

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



Ivanovo State Power Engineering University

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

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

Issue 4 /2020

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

EDITORIAL BOARD:

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

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

The issue is prepared by:

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

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office
Technical Editor
Editor

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

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

M.V. Kozlova, P.S. Sokolov, A.V. Bannikov.
Investigation of humid air physical properties
influence on the heat and mass transfer
processes calculation accuracy.....**5**

A.B. Larin, V.V. Kozlovsky, M.P. Savinov.
Methodology for studying the quality of steam
condensate and cooling water of a steam turbine
condenser.....**14**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

O.S. Melnikova, M.V. Prusakov, A.A. Zholobov. Study of the effect of cellulose fibers on the
electrical strength of transformer oil.....**23**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

A.A. Anisimov, S.V. Tararykin, G.N. Roschin.
Development and practical implementation of
automatic tuning methods for mechatronic
system digital controllers.....**34**

A.A. Nikolaev, M.V. Bulanov, K.A. Shakhbieva.
Development of adaptive PWM algorithm for an
active rectifier and a method for diagnosing
resonant phenomena in in-plant networks.....**44**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

**A.E. Barochkin, V.P. Zhukov, M.S. Shumilova,
E.V. Barochkin, A.N. Belyakov.** Optimization of
the structure and mode of operation of complex heat
and mass transfer multicomponent systems.....**55**

V.A. Naumov. Analysis of the non-stationary
mathematical model of a simple hydraulic
network with a centrifugal pump.....**64**

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

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

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

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

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.6.022

Мария Владимировна Козлова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Павел Сергеевич Соколов

ООО «КУБ», исполнительный директор, Россия, Иваново, e-mail: ptpm1@yandex.ru

Александр Васильевич Банников

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Исследование влияния реальных физических свойств влажного воздуха на точность расчета тепломассообменных процессов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Влажный воздух, представляющий собой смесь сухого воздуха и водяного пара, широко используется в различных энергетических и технических устройствах. В основе большинства теоретических исследований свойств влажного воздуха лежит уравнение идеального газа Менделеева-Клапейрона, не учитывающее ассоциацию, межмолекулярное взаимодействие и особенности термодинамического поведения влажного воздуха как смеси газов. Использование данного уравнения приводит к погрешности в определении параметров состояния влажного воздуха, которая может достигать 55 %. Соответственно, малоизученными остаются вопросы, касающиеся определения реальных свойств влажного воздуха.

Материалы и методы. При рассмотрении влажного воздуха как идеального газа использовано уравнение состояния Менделеева-Клапейрона. Для исследования действительных параметров состояния влажного воздуха и его свойств использованы уравнения состояния реального газа Вукаловича-Новикова и Молье.

Результаты. Рассмотрены несколько уравнений состояния реального газа, учитывающие взаимодействие молекул водяного пара. Определены действительные физические свойства влажного воздуха, проведена оценка их влияния на сопряженный процесс тепломассообмена для различных условий. Получены действительные значения теплофизических свойств влажного воздуха. Определены термодинамические границы применения уравнений состояния Менделеева-Клапейрона, Вукаловича-Новикова и Молье для влажного воздуха. Показано, что уравнение состояния Вукаловича-Новикова наилучшим образом передает количественные соотношения между давлением, удельным объемом и температурой насыщенного влажного воздуха, его применение позволяет снизить погрешность вычислений на 39–50 %.

Выводы. Полученные результаты позволяют повысить точность расчета процессов тепломассопереноса при проектировании контактных теплообменных аппаратов, конвективных сушильных установок и гигроскопических опреснителей, компрессоров, в которых осуществляется процесс сжатия с впрыском воды или водяного пара, а также камер сгорания, в которых происходит смешение дымовых газов с водяным паром.

Ключевые слова: влажный воздух, реальный газ, влагосодержание, теплофизические свойства влажного воздуха, уравнение состояния

Mariya Vladimirovna Kozlova

Ivanovo State Power Engineering University, student at the Department of Heat Power Engineering, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Pavel Sergeevich Sokolov

LLC «KUB», executive Director, Russia, Ivanovo, e-mail: ptpm1@yandex.ru

Aleksandr Vasilievich Bannikov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering, Russia, Ivanovo, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Investigation of humid air physical properties influence on the heat and mass transfer processes calculation accuracy

Abstract

Background. Humid air is a mixture of dry air and water vapor and is widely used in various power and technical devices. Most theoretical studies of the properties of humid air are based on Mendeleev-Clapeyron ideal gas equation, which doesn't take into account the association, intermolecular interaction, and particularities of the thermodynamic behavior of humid air as a mixture of gases. The use of this equation leads to inaccuracy in determining the parameters of the state of humid air, which can reach up to 55 %. Therefore, the issues concerning the actual properties of humid air determining remain poorly understood.

Materials and methods. The ideal gas model is based on Mendeleev-Clapeyron equation. To study the actual parameters of the humid air state and its properties, Vukalovich-Novikov's and Molie's real gas state equations have been used.

Results. Several equations of the state of real gas, taking into account the interaction of water vapor molecules have been considered. The actual physical properties of humid air are determined, and their influence on the coupled heat and mass transfer processes for various conditions is evaluated. The actual values of the thermophysical properties of humid air have been derived. The thermodynamic limits for humid air have been determined using Mendeleev-Clapeyron's, Vukalovich-Novikov's and Molie's state equations. It has been proved Vukalovich-Novikov's state equation to be the best to represent the quantitative relations between the pressure, specific volume, and the temperature of saturated water vapor. Its application reduces the error of calculations by 39–50 %.

Conclusions. The results obtained allow to improve the accuracy of calculating heat and mass transfer when designing contact heat exchangers, convective drying units and hygroscopic desalination plants, compression processes with water or water vapor injection, as well as the processes of mixing flue gases with water vapor in the combustion chambers of gas-steam installations.

Key words: humid air, real gas, moisture content, thermophysical properties of humid air, state equation

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.005-013

Введение. Одной из самых распространенных смесей, применяющихся в качестве рабочего тела существенного числа процессов, протекающих в различных теплообменных аппаратах, является смесь сухого воздуха и воды. Для проведения адекватных конструктивных, поверочных и наладочных расчетов, а также для определения оптимальных условий работы теплообменного оборудования необходимо учитывать влияние реальных теплофизических свойств влажного воздуха на процессы с его участием.

Как теплоноситель влажный воздух широко используется в системах вентиляции и кондиционирования воздуха, в гигроскопических опреснительных установках, в контактных теплообменных аппаратах,

конвективных сушилках, пневматических установках и пр.

В силу того, что контактные теплообменные аппараты являются более энергетически эффективными по сравнению с поверхностными, исследование особенностей рабочих сред, взаимодействующих в них, является актуальным. Высокая энергетическая эффективность контактных теплообменных аппаратов обусловлена тем, что за счет непосредственного контакта сред без непроницаемой стенки процесс подвода теплоты является термодинамически более совершенным, так как ведет к снижению внешней необратимости процесса, т. е. более полному использованию потенциала теплоты. Организация теплообмена посредством контакта сред позволяет

уменьшить металлоемкость и коррозионно-эрозийный износ теплообменника, повысить надежность и тем самым обуславливает все более широкое и перспективное применение контактных аппаратов в промышленности.

Учитывая, что в процессе теплообмена в контактных аппаратах все параметры влажного воздуха меняются, для анализа этих процессов недостаточно использовать методы термодинамики идеального газа, которые применяются для анализа смесей постоянного состава.

Термодинамическая система, находящаяся в состоянии равновесия, характеризуется определенными значениями параметров состояния: давлением, температурой и удельным объемом. Уравнение состояния, устанавливающее связь между этими параметрами, именуется термическим уравнением.

На сегодняшний день известно более 150 уравнений состояния, полученных отечественными и зарубежными учеными: уравнения Гирна, Дюпре, Ван-дер-Ваальса, Бачинского, Линде, Планка, Моляе, Яцына, Вукаловича и Новикова, Васильева, Вроблевского, Шиллера, Клаузиуса, Бертелло, Дитеричи, Воли, Ван-Лаара, Каллендара, Битти и Бриджмена, Каммерлинг-Оннеса, Майера, Боголюбова и др. Часть полученных уравнений является уточнением уравнения Ван-дер-Ваальса, другие получены экспериментально [1–4].

Материалы и методы. Свойства паровоздушной смеси зависят от количественного состава ее компонентов. При незначительном содержании водяного пара или невысоких давлениях смесь обладает свойствами, близкими к свойствам идеального газа. При нормальных условиях компоненты влажного воздуха ведут себя как идеальные газы [5]. В связи с этим в ряде случаев для определения его параметров можно использовать уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$pv = RT, \quad (1)$$

где p – давление газа, Па; v – удельный объем газа, м³/кг; T – температура газа, К; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Наличие во влажном воздухе составляющей, способной при понижении температуры переходить в жидкую или твердую фазу и выделяться из смеси, вызывает

различное поведение сухого и влажного воздуха в тепловых процессах.

Современная теория уравнения состояния реальных газов базируется на принципиальных положениях теории Ван-дер-Ваальса. Наиболее полно вопросы, связанные с уравнением состояния реальных газов, были проработаны в трудах Майера и его сотрудников. Существенный вклад в изучение данной темы также внес наш соотечественник Н. Боголюбов.

Уравнение Ван-дер-Ваальса является результатом попыток получить характеристическое уравнение на основании умозаключений, вытекающих из представлений о строении вещества. Вычисление постоянных коэффициентов опытным путем придает ему эмпирический характер.

Уравнение Ван-дер-Ваальса имеет вид [6]

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT, \quad (2)$$

где a , b – поправки уравнения Ван-дер-Ваальса, Н·м⁴/кг², м³/кг.

Для каждого газа поправки рассчитываются индивидуально, они зависят от критических параметров газа:

$$a = \frac{27 \cdot R^2 T_{кр}^2}{64 \cdot p_{кр}}; \quad (3)$$

$$b = \frac{R T_{кр}}{8 \cdot p_{кр}}, \quad (4)$$

где $T_{кр}$ – критическая температура, К; $p_{кр}$ – критическое давление, Па.

Внесение поправки a/v^2 позволяет учесть внутреннее давление, определяемое взаимным притяжением молекул газа, b – это поправка на объем самих молекул [7].

В соответствии с теорией Ван-дер-Ваальса, в каждый данный момент сталкивается только одна пара молекул. Данное уравнение справедливо для таких состояний газа, при которых общий объем, занимаемый газом, во много раз превышает собственный объем молекул газа. Степень разреженности газа должна быть такой, чтобы тройные и более сложные столкновения молекул отсутствовали. Условия применения данного уравнения ограничены, его целесообразно использовать при сравнительно высоких температурах. Соответственно, уравнение Ван-дер-Ваальса применительно только к тем состояниям реального газа, которые незначительно отличаются от идеального.

Уравнение Ван-дер-Ваальса не отвечает действительному переходу от газа к жидкости, т. е. теряет свою силу в области фазовых превращений. Значения P и v , полученные из уравнения Ван-дер-Ваальса для любых состояний реальных газов, практически всегда являются большими по сравнению со значениями, полученными экспериментально. Данная закономерность наблюдается в основном в области насыщенных и ненасыщенных паров. Полученная зависимость не дает количественных результатов, точность которых достаточна для практических целей. В связи с этим последующие работы исследователей в этой области заключались в попытках получить уравнение состояния реального газа эмпирическим путем.

Эмпирические уравнения хотя и дают часто достаточно точные результаты, но в большинстве случаев они получены для конкретного вещества, что лишает их общности, которой обладают уравнения, полученные на основе представлений о строении вещества.

Стремление получить более точное уравнение, учитывающее, в том числе, и строение вещества, привело к необходимости дальнейшего использования уравнения Ван-дер-Ваальса. Одним из ученых, продолживших данную работу, стал профессор В.П. Вукалович, который смог учесть помимо влияния сил сцепления и объема самих молекул их ассоциацию, заключающуюся в объединении одиночных молекул в двойные, тройные и тому подобные сложные соединения. Если учитывать ассоциацию, то газ является не однородным, а смесью газов, состоящей из одиночных, двойных, тройных и т.д. молекул.

Уравнение Вукаловича, в котором принята во внимание ассоциация только с образованием двойных молекул, имеет вид

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \left(1 - \frac{Cp}{T^{\frac{5+2m}{2}}}\right), \quad (5)$$

где C – константа; m – величина, определяющая свойства двойной молекулы.

Позднее, в 1939 году, совместно с профессором И.И. Новиковым было получено новое уравнение, которое было взято за основу при создании первых таблиц воды и водяного пара, выпущенных в 1940 г. М.П. Вукаловичем. Совместными усилиями ученых уравнение было существенно уточ-

нено, пределы его применения значительно расширены, и оно обрело вид

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \left(1 - \frac{C}{v T^{\frac{3+2m}{2}}}\right), \quad (6)$$

где C , m – постоянные, определяемые на основании опытных данных.

Термодинамическая система, представляющая собой смесь пара и сухого воздуха, является реальным газом в том случае, когда в ней содержится достаточно большое количество паров воды, близких к состоянию насыщения. Соответственно, применение законов идеальных газов дает существенную погрешность, величина которой возрастает с увеличением количества пара, находящегося в этой смеси, так как водяной пар является реальным газом.

Одним из наиболее часто используемых уравнений состояния реальных газов является уравнение Молье, в соответствии с которым удельный объем вещества может быть определен по формуле

$$v = \frac{RT}{p} - \frac{b}{(T/100)^2} - \frac{cp^2}{(T/100)^{13.5}}, \quad (7)$$

где b , c – константы уравнения Молье для водяного пара: $b = 1,45 \text{ K}^2 \cdot \text{м}^3/\text{кг}$, $c = 5,8 \text{ м}^7 \cdot \text{K}^2/(\text{кг} \cdot \text{Н}^2)$.

Для решения практических задач важным аспектом является выбор уравнения состояния, на основании которого будет проводиться определение параметров состояния вещества.

Результаты. Рассмотрим три термических уравнения состояния при параметрах водяного пара ниже критической точки ($p_{кр} = 22,11 \text{ МПа}$; $T_{кр} = 647,3 \text{ К}$).

Уравнение Менделеева-Клапейрона описывает модель идеального газа, в которой пренебрегают силами межмолекулярного взаимодействия и размерами молекул. В результате проведенного исследования установлено, что при использовании модели идеального газа при определении параметров состояния водяного пара с повышением давления и увеличением температуры погрешность возрастает (рис. 1). При этом за эталонные значения параметров состояния принимаются табличные значения [8]. В диапазоне температур от 0 до 100 °С данное уравнение вполне применимо, так как погрешность, полученная при расчете, в данном случае не превышает 1,5 %, что позволяет пользоваться им при

определении параметров воздуха при проектировании систем кондиционирования и вентиляции. При дальнейшем повышении температуры и давления отклонение увеличивается, при этом возрастание носит параболический характер и достигает при критических параметрах 75 %.

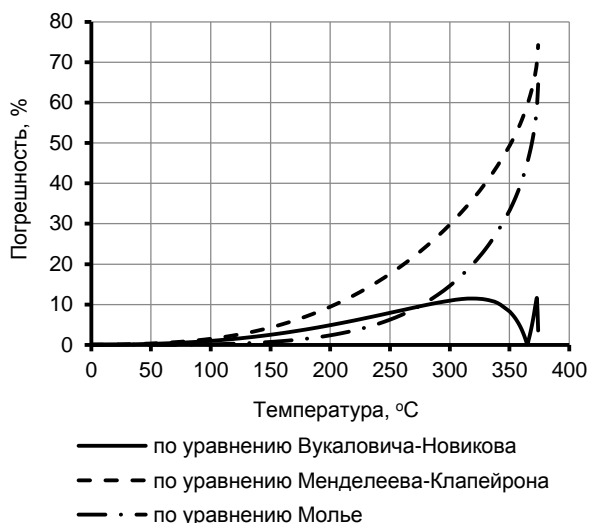


Рис. 1. Зависимость величины средних относительных отклонений параметров состояния сухого насыщенного водяного пара от его температуры

Свойства реальных газов тем больше отклоняются от свойств идеальных, чем выше плотность газа и ниже его температура. Отклонение особенно велико в области изменения агрегатного состояния. Водяной пар, находящийся в воздухе, в состоянии, близком к насыщению, не может быть отнесен к идеальным газам.

Уравнение Молье достаточно хорошо учитывает свойства водяного пара, относится к классу уравнений, в которых поправка к объему дается как функция давления и температуры. В результате выполненных расчетов установлено, что оно позволяет более точно определять параметры водяного пара в диапазоне температур от 0 до 270 °C, с дальнейшим изменением температуры погрешность возрастает, а при приближении к критическим параметрам резко увеличивается и достигает 65 %.

Показано, что наибольшую сходимость между параметрами состояния дает уравнение Вукаловича-Новикова, оно позволяет получать достаточно точные значения в диапазоне температур от 0 °C до $T_{кр}$, однако при температурах менее 270 °C по

своей точности оно уступает уравнению Молье. На начальном участке погрешность в определении параметров увеличивается, и это происходит вплоть до температуры 320 °C, в дальнейшем по мере приближения к $T_{кр}$ погрешность снижается, а затем резко возрастает и вновь падает.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что влияние ассоциации, возникающей между молекулами газа, возрастает с повышением температуры и давления водяного пара, влияние межмолекулярного взаимодействия также усиливается. Уравнения Молье и Вукаловича-Новикова в определенных пределах дают достаточно точные результаты, при более низких температурах целесообразно использовать первое, с возрастанием температуры необходимо обратиться ко второму уравнению.

Анализ зависимостей, описывающих процессы массообмена, показывает, что в качестве движущей силы массообмена наиболее часто используют разность влагосодержания газа [9]. В связи с этим значимым является корректное определение влагосодержания газов.

В соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона для водяного пара, расчетное выражение для влагосодержания влажного воздуха имеет вид

$$d_u = \frac{R_{св}}{R_n} \frac{p_n}{p_{св}},$$

где $R_{св}$ — газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(кг·К); p_n — парциальное давление пара, Па; $p_{св}$ — парциальное давление сухого воздуха, Па.

При этом в расчетах можно принимать, что газовая постоянная остается неизменной, в связи с тем что ее значение изменяется незначительно.

В соответствии с тем, что молекулярная масса водяного пара составляет 18,016 г/моль, его газовая постоянная равна 461,479 Дж/(моль·К).

Рассмотрим уравнение Вукаловича-Новикова применительно к водяному пару, содержащемуся во влажном воздухе. Умножая обе части равенства (6) на массу пара m_n , учитывая, что объем пара $V = v_n m_n$, где v_n — удельный объем пара, м³/кг, после раскрытия скобок и преобразования получим

$$V \left(p_n - \frac{p_n b}{v_n} + \frac{a}{v_n^2} - \frac{ab}{v_n^3} \right) \cdot \left(1 - \frac{c}{v_n T^{\frac{3+2m}{2}}} \right) = m_n R_n T. \quad (8)$$

Разделив правую и левую части уравнения (6) на соответствующие части уравнения Менделеева-Клапейрона (1) для сухого воздуха, свойства которого близки к свойствам идеального газа, получим выражение для определения действительного влагосодержания влажного воздуха:

$$d_d = \frac{R_{св}}{R_n} \frac{p_n}{p_{св}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{b}{v_n} + \frac{a}{p_n v_n^2} - \frac{ab}{p_n v_n^3} \right)}{\left(1 - \frac{c}{v_n T^{\frac{3+2m}{2}}} \right)}. \quad (9)$$

Аналогичные преобразования проведем с уравнением Молье (7). В результате получим расчетную формулу для определения влагосодержания:

$$d_d = \frac{R_{св}}{R_n} \frac{p_n}{p_{св}} \times \left(\frac{R_n T}{0,00461 \cdot T - 1,45 \cdot p_n \left(\frac{100}{T} \right)^{3,2} - 5,8 \cdot p_n \left(\frac{100}{T} \right)^{13,5}} \right). \quad (10)$$

Определим предельные значения влагосодержаний по уравнениям реального и идеального газов, вычислим относительное отклонение влагосодержаний:

$$\delta = \frac{d_d - d_i}{d_d} \cdot 100 \%. \quad (11)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Относительные отклонения значений предельных влагосодержаний влажного воздуха

Давление смеси 0,1 МПа									
Температура, °C	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	0,012 %	0,022 %	0,036 %	0,058 %	0,089 %	0,136 %	0,199 %	0,284 %	0,395 %
Отклонение по уравнению Молье	0,154 %	0,184 %	0,231 %	0,296 %	0,391 %	0,504 %	0,657 %	0,849 %	1,085 %
Давление смеси 0,5 МПа					Давление смеси 1,5 МПа				
Температура, °C	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	0,537 %	0,718 %	0,943 %	1,220 %	1,555 %	1,958 %	2,437 %	3,000 %	3,660 %
Отклонение по уравнению Молье	1,703 %	2,093 %	2,539 %	3,043 %	3,605 %	4,225 %	4,225 %	4,902 %	5,634 %
Давление смеси 3,0 МПа					Давление смеси 6,0 МПа				
Температура, °C	190	200	210	220	230	240	250	260	270
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	4,426 %	5,310 %	6,325 %	7,485 %	9,241 %	10,305 %	12,004 %	13,919 %	16,083 %
Отклонение по уравнению Молье	6,420 %	7,258 %	8,143 %	9,073 %	10,604 %	11,056 %	12,102 %	13,181 %	14,289 %
Давление смеси 10,0 МПа					Давление смеси 20,0 МПа				
Температура, °C	280	290	300	310	320	330	340	350	360
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	18,528 %	21,273 %	22,480 %	27,894 %	31,841 %	36,336 %	41,485 %	47,458 %	54,845 %
Отклонение по уравнению Молье	15,423 %	16,583 %	17,766 %	18,971 %	20,198 %	21,449 %	22,715 %	24,027 %	25,371 %

Таким образом, относительное отклонение в определении влагосодержания влажного воздуха при атмосферном давлении незначительно и не превышает 1,1 %. В дальнейшем интенсивность увеличения погрешности при меняющихся давлении и температуре возрастает и в области критических параметров достигает 60 %. При определении параметров сжатого влажного воздуха [10] необходимо учитывать тот факт, что он является реальным газом.

Еще раз отметим, что теплофизические свойства влажного воздуха существенно зависят от количества водяного пара, входящего в его состав. В частности, это сказывается на величине изобарной и изохорной теплоемкостей влажного воздуха. С увеличением доли пара удельная массовая теплоемкость возрастает. Численные значения и характер ее изменения представлены на рис. 2.

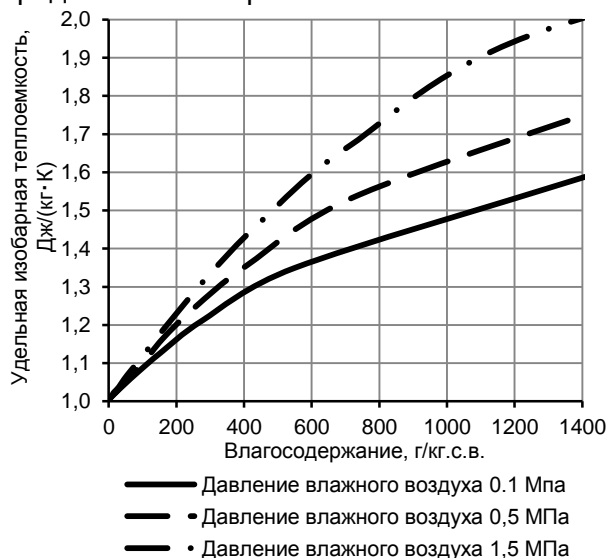


Рис. 2. Изменение удельной изобарной теплоемкости влажного воздуха при постоянном давлении в зависимости от влагосодержания

В рамках исследования по методике, представленной в [11], рассчитаны все теплофизические свойства влажного воздуха.

Таблица 2. Зависимость коэффициентов теплопроводности сухого воздуха, перегретого пара и влажного воздуха от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\lambda_{\text{св}} \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	2,440	2,510	2,590	2,670	2,760	2,830	2,900	2,960	3,050	3,130	3,210
$\lambda_{\text{п}} \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	1,760	1,820	1,880	1,940	2,010	2,090	2,160	2,230	2,310	2,341	2,372
$\lambda_{\text{вв}} \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	2,436	2,501	2,574	2,639	2,705	2,738	2,754	2,735	2,703	2,584	2,372

При значительном содержании влаги или высоких температурах удобнее работать с составом смеси, выраженном долевой концентрацией, весовыми, объемными или молярными долями пара [12]. Для определения действительных теплофизических свойств влажного воздуха целесообразно обращаться с массовыми и объемными паросодержаниями смеси:

$$g_n = \frac{d_d}{d_d + 1}; \quad (12)$$

$$r_n = \frac{d_d}{d_d + \frac{R_{\text{св}}}{R_n}}. \quad (13)$$

Значение коэффициента теплопроводности меняется незначительно при невысоких температурах влажного воздуха. По мере увеличения температуры насыщения и парциального давления водяного пара коэффициент теплопроводности стремится к коэффициенту теплопроводности самого пара, что наглядно видно на значениях, полученных для атмосферного давления (табл. 2). Значение коэффициента динамической вязкости влажного воздуха существенно зависит от объемного паросодержания.

На начальном участке графической зависимости (рис. 3) наблюдается рост динамической вязкости. Это явление обусловлено тем, что влияние свойств водяного пара мало, в дальнейшем, после достижения максимума, это влияние усиливается и приводит к существенному снижению динамической вязкости. Соответственно, в том случае, когда влажный воздух находится в состоянии насыщения и при относительно высокой температуре, необходимо учитывать вклад динамической вязкости водяного пара в значение данной величины. При малых значениях парциальных давлений водяного пара это влияние пренебрежимо мало.

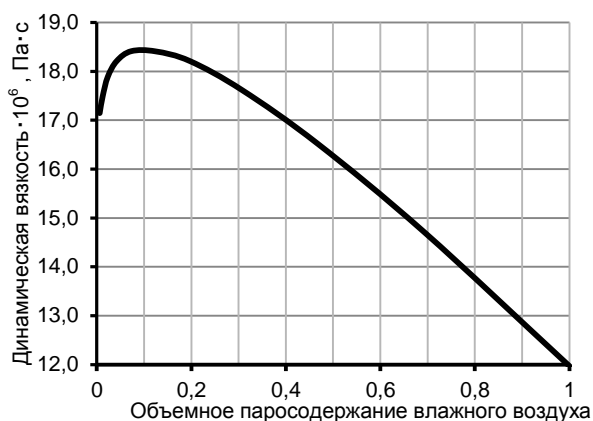


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости насыщенного влажного воздуха от объемного паросодержания

При атмосферном давлении с увеличением влагосодержания влажного воздуха его плотность уменьшается в связи с тем, что при данных параметрах водяной пар имеет плотность меньшую, чем сухой воздух. С дальнейшим повышением давления и температуры смеси ее плотность возрастает и, как следствие, уменьшается кинематическая вязкость, связанная с динамической вязкостью соотношением

$$\nu = \mu_{\text{вв}} / \rho_{\text{вв}}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{вв}}$ — плотность влажного воздуха, кг/м^3 .

Критерий Прандтля влажного воздуха по мере увеличения температуры возрастает, при этом интенсивность роста увеличивается в области температур, близких к температуре насыщения при данном давлении смеси. В то время как критерий Прандтля для сухого воздуха уменьшается (рис. 4).

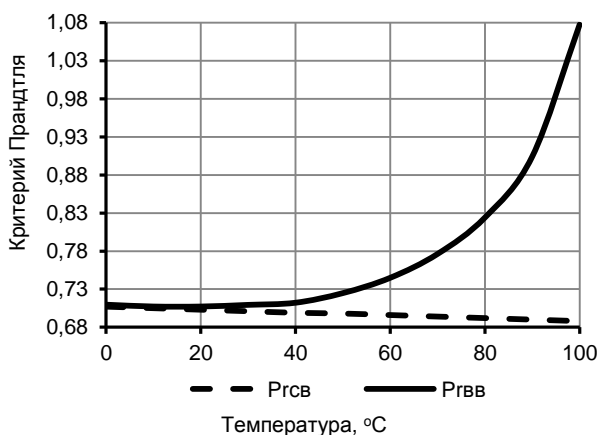


Рис. 4. Зависимость критерия Прандтля для сухого и влажного насыщенного воздуха от температуры

Выводы. Результаты проведенного исследования показывают, что при расчете процессов сопряженного теплообмена в диапазоне параметров, характерных для контактных теплообменных аппаратов, гигроскопических опреснительных установок, конвективных сушильных аппаратов, а также при расчете процессов сжатия воздуха в компрессоре с впрыском воды или пара в его промежуточные ступени и процесса расширения в турбинах парогазовых установок с впрыском воды в камеру сгорания необходимо учитывать реальные свойства влажного воздуха, в особенности в том случае, когда речь идет о влажном насыщенном воздухе и параметрах, близких к критическим. Использование в данных обстоятельствах уравнения Менделеева-Клапейрона приводит к существенной погрешности.

Список литературы

1. Кочетков А.В., Федотов П.В. Молекулярно-фотонная теория газов. — М.: Мир науки, 2018. — 180 с.
2. Павловский В.А., Мишутинский В.Н., Неверов С.А. Сравнительный анализ различных термических моделей состояния реальных газов // Морские интеллектуальные технологии. — 2015. — № 4-1. — С. 66–70.
3. Павловский В.А., Чистов А.Л. Моделирование динамики заполнения резервуара реальным газом // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2014. — № 3. — С. 46–57.
4. Александров А.А., Орлов К.А. Термодинамические свойства влажного воздуха при высоких давлениях и температуре // Теплоэнергетика. — 2007. — № 7. — С. 36–39.
5. Properties of humid air for calculating power circles / S. Herrmann, H.J. Kretschmar, V. Teske, et. al. // Journal of engineering for gas turbines and power. — 2010. — No. 9. — P. 91–96.
6. Фогельсон Р.Л., Лихачев Е.Р. Уравнение состояния реального газа // Журнал технической физики. — 2004. — № 7. — С. 129–130.
7. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. — М.: Машиностроение, 1972. — 671 с.
8. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 80 с.
9. Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. — 192 с.

10. Фаворский О.Н., Бессмертных А.В.

Пути повышения эффективности конверсионных ГТУ газопарового цикла малой мощности // Теплоэнергетика. – 2005. – № 6. – С. 48–55.

11. Баранников Н.М.

Расчеты параметров влажного воздуха для пневматических и вентиляционных установок и кондиционеров. – М.: Недра, 1975. – 272 с.

12. Михайловский Г.А.

Термодинамические расчеты парогазовых смесей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 184 с.

References

1. Kochetkov, A.V., Fedotov, P.V. *Molekulyarno-fotonnaya teoriya gazov* [Molecular and photon theory of gases]. Moscow: Mir nauki, 2018. 180 p.

2. Pavlovskiy, V.A., Mishutinskiy, V.N., Neverov, S.A. *Sravnitel'nyy analiz razlichnykh termicheskikh modeley sostoyaniya real'nykh gazov* [Comparative analysis of the different thermal models of the real gases state]. *Morskije intelektual'nye tekhnologii*, 2015, no. 4-1, pp. 66–70.

3. Pavlovskiy, V.A., Chistov, A.L. *Modelirovanie dinamiki zapolneniya rezervuara real'nyim gazom* [Modeling the dynamics of tank filling with real gas]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*, 2014, no. 3, pp. 46–57.

4. Aleksandrov, A.A., Orlov, K.A. *Termodinamicheskie svoystva vlazhnogo vozdukha pri vysokikh davlenii i temperature* [Thermodynamic properties of the moist air at high pressure and temperature]. *Teploenergetika*, 2007, no. 7, pp. 36–39.

5. Herrmann, S., Kretschmar, H.J., Teske, V., Vogel, E., Ulbig, P., Span, R., Gatley, D.P.

Properties of humid air for calculating power circles. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2010, no. 9, pp. 91–96.

6. Fogel'son, R.L., Likhachev, E.R. *Uравnenie sostoyaniya real'nogo gaza* [Real gas state equation]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2004, no. 7, pp. 129–130.

7. Vukalovich, M.P., Novikov, I.I. *Termodinamika* [Thermodynamics]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 671 p.

8. Rivkin, S.L., Aleksandrov, A.A. *Termodinamicheskie svoystva vody i vodyanogo para* [Thermodynamic properties of water and steam]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 80 p.

9. Andreev, E.I. *Raschet teplo- i massoobmena v kontaktnykh apparatakh* [Calculation of heat and mass transfer in contact devices]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985. 192 p.

10. Favorskiy, O.N., Bessmertnykh, A.V. *Puti povysheniya effektivnosti konversionnykh GTU gazoparovogo tsikla maloy moshchnosti* [Ways to improve the efficiency of conversion GTPs of a gas-steam cycle of low power]. *Teploenergetika*, 2005, no. 6, pp. 48–55.

11. Barannikov, N.M. *Raschety parametrov vlazhnogo vozdukha dlya pnevmaticheskikh i ventilyatsionnykh ustanovok i konditsionerov* [Calculations of moist air parameters for pneumatic and ventilation units and air conditioners]. Moscow: Nedra, 1975. 272 p.

12. Mikhaylovskiy, G.A. *Termodinamicheskie raschety parogazovykh smesey* [Thermodynamic calculations of gas-vapor mixtures]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985. 184 p.

УДК 621.186.1

Андрей Борисович Ларин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Владислав Вадимович Козловский

ООО «Водные технологии-инжиниринг», инженер-технолог, Россия, Москва, e-mail: kozlovsky_vti@mail.ru

Максим Павлович Савинов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», соискатель кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, e-mail: max_savinov37@mail.ru

Методика исследования качества конденсата пара и охлаждающей воды конденсатора паровой турбины

Авторское резюме

Состояние вопроса. Контроль присосов охлаждающей воды в пар с измерениями χ , χ_n и pH конденсата является одновременно характеристикой водно-химического режима основного контура и системы оборотного (или прямоточного) охлаждения и привлекает в последние годы повышенное внимание. Это связано как со значительными присосами охлаждающей воды в конденсирующийся пар на энергоблоках ТЭС и АЭС, так и с появлением на рынке новых реагентов – ингибиторов отложений и коррозии. Исследование поведения таких веществ в условиях системы оборотного охлаждения является сложной задачей, решение которой зависит от многих факторов. Целью научного исследования является разработка методики приборного (автоматизированного) контроля, основанного на измерениях электропроводности (χ и χ_n) и pH, которая позволяет уменьшить число контролируемых параметров циркуляционной воды, повысить информативность результатов измерений по величине присосов циркуляционной воды в конденсирующийся пар.

Материалы и методы. Реализация задачи в лабораторных условиях осуществлена с использованием экспериментального стенда «Установка обратного осмоса и химического обессоливания», обеспечивающего возможность измерений удельной электропроводности прямой (χ) и H-катионированной (χ_n) пробы конденсата пара и расчета по авторскому алгоритму ряда нормируемых параметров. Большой объем химического контроля качества добавочной и циркуляционной воды в системе оборотного охлаждения ограничивает оперативность исследований и требует больших трудозатрат. В этом случае может быть использован метод косвенного (расчетного) определения концентраций ионогенных примесей путем их расчета по авторскому алгоритму при использовании измеренных значений электропроводности и pH.

Результаты. Представлены две лабораторные установки: обратного осмоса и химического обессоливания; моделирования водного режима систем оборотного охлаждения. Предложена методика исследования состояния водно-химического режима конденсатора паровой турбины как со стороны пара, так и со стороны охлаждающей воды. Приведены примеры использования методики для расчета характеристик конденсата пара и охлаждающей воды. Показано, что использование приборных измерений удельной электропроводности и pH позволяет сократить объем лабораторного химического контроля водных сред, повысить оперативность и информативность результатов измерений.

Выводы. На лабораторную установку обратного осмоса и химического обессоливания получен патент на изобретение РФ №2658020. Отличительной особенностью установки является возможность получения глубокообессоленной воды с удельной электропроводностью менее 0,2 мкСм/см с последующим приготовлением предельно разбавленных растворов. Вторая лабораторная установка моделирует водный режим систем оборотного охлаждения и может использоваться в условиях работ электростанции. Научная новизна методики химического контроля качества конденсата пара и циркуляционной воды состоит в использовании оригинального авторского алгоритма, обеспечивающего расчет ряда нормируемых показателей по измеренным значениям электропроводности и pH.

Ключевые слова: конденсатор паровой турбины, водно-химический режим конденсатора, удельная электропроводность, pH конденсата, обратный осмос, химическое обессоливание, химический контроль водных сред

Andrey Borisovich Larin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technologies in Energy, Russia, Ivanovo, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Vladislav Vadimovich Kozlovsky

LLC «Water technologies-engineering», process engineer, Russia, Moscow, e-mail: kozlovsky_vti@mail.ru

Maksim Pavlovich Savinov

Ivanovo State Power Engineering University, candidate of the Department of Chemistry and Chemical Technologies in Energy, Russia, Ivanovo, e-mail: max_savinov37@mail.ru

Methodology for studying the quality of steam condensate and cooling water of a steam turbine condenser

Abstract

Background. Monitoring the suction of cooling water into steam with measurements of χ , χ_H and pH of condensate is simultaneously a characteristic of the water-chemical regime of the main loop and the system of circulating (or direct-flow) cooling and has attracted increased attention in recent years. This is due both to the significant suction of cooling water into the condensing steam at the power units of TPPs and NPPs, and to the appearance on the market of new reagents – deposit and corrosion inhibitors. Investigation of the behavior of such substances under conditions of a recirculating cooling system is a complex task, the solution of which depends on many factors. The purpose of the scientific research was to develop a methodology for instrumental (automated) control based on measurements of electrical conductivity (χ and χ_H) and pH, which makes it possible to reduce the number of controlled parameters of circulating water, to increase the information content of the measurement results in terms of the amount of suction of circulating water into condensing steam.

Materials and methods. The implementation of the task in laboratory conditions was carried out using the experimental stand «Installation of reverse osmosis and chemical desalination», which provides the ability to measure the specific electrical conductivity of direct (χ) and H-cationized (χ_H) samples of steam condensate and calculate a number of normalized parameters according to the author's algorithm. A large volume of chemical quality control of the make-up and circulating water in the recirculating cooling system limits the efficiency of research and requires large labor costs. In this case, the method of indirect (calculated) determination of the concentrations of ionic impurities can be used by calculating them according to the author's algorithm using the measured values of electrical conductivity and pH.

Results. Two laboratory units are presented: reverse osmosis and chemical desalination; modeling the water regime of recirculating cooling systems. A method is proposed for studying the state of the water-chemical regime of a steam turbine condenser both from the side of steam and from the side of cooling water. Examples of using the methodology for calculating the characteristics of steam condensate and cooling water are given. It is shown that the use of instrumental measurements of specific electrical conductivity and pH makes it possible to reduce the volume of laboratory chemical control of aqueous media, to increase the efficiency and information content of the measurement results.

Conclusions. A patent for an invention of the Russian Federation No. 2658020 was obtained for a laboratory installation of reverse osmosis and chemical desalination. A distinctive feature of the installation is the ability to obtain deeply demineralized water with a specific electrical conductivity of less than 0,2 $\mu\text{S} / \text{cm}$ with the subsequent preparation of extremely dilute solutions. The second laboratory unit simulates the water regime of recirculating cooling systems and can be used in the operating conditions of the power plant. The scientific novelty of the method for the chemical quality control of steam condensate and circulating water consists in the use of an original author's algorithm, which provides the calculation of a number of standardized indicators based on the measured values of electrical conductivity and pH.

Key words: steam turbine capacitor, water-chemical capacitor mode, specific electrical conductivity, pH condensate, reverse osmosis, chemical dessaling, chemical controll water environments

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.014-022

Введение. В конденсате паровой турбины контроль качества конденсата пара сочетается с необходимостью контроля качества охлаждающей воды. Ос-

новным источником примесей конденсата являются присосы охлаждающей воды и воздуха, загрязняющие конденсат солями, углекислотой и кислородом. Нормативные

документы¹ ограничивают содержание примесей конденсата, при этом основным способом контроля ионогенных примесей является измерение электропроводности [1]. При разных водно-химических режимах (ВХР) (гидразинно-аммиачный – ГАВР, аммиачный – АВР, аминсодержащий – АСР) возможны разные значения удельной электропроводности конденсата (χ) при жестком нормировании показателя электропроводности Н-катионированной пробы $\chi_{\text{Н}} = 0,3$ мкСм/см [2]. Выход за нормируемый предел показателя $\chi_{\text{Н}}$ возможен за счет солевых примесей или уголекислоты, а также в результате проскока в фильтрат Н-колоники кондуктометра, корректирующего ВХР вещества, например органического амина [3, 4]. Разные причины предполагают разные пути решения проблемы. При измерении в конденсате паровой турбины нормируемых показателей χ , $\chi_{\text{Н}}$ и pH [1] появляется возможность увеличения информативности автоматического химического контроля (АХК) путем анализа ионных равновесий и расчета концентраций некоторых примесей. Для этого необходимо провести исследования физико-химических свойств предельно-разбавленных водных растворов отдельных примесей и их смесей на лабораторном стенде и разработать алгоритм расчетного определения их концентраций с возможностью использования методики в промышленных условиях.

Контроль присосов охлаждающей воды в пар с измерениями χ , $\chi_{\text{Н}}$ и pH конденсата является одновременно характеристикой водно-химического режима системы обратного (или прямоточного) охлаждения и привлекает в последние годы повышенное внимание [4–7]. Это связано как со значительными присосами охлаждающей воды в конденсирующийся пар на энергоблоках ТЭС и АЭС, так и с появлением на рынке новых реагентов – ингибиторов отложений и коррозии, как правило азот- или фосфорсодержащих органических веществ или их композиций [7–9]. Исследование поведения таких веществ в условиях системы

обратного охлаждения (СОО) является сложной задачей, решение которой зависит от качества добавочной воды, степени концентрирования примесей в циркуляционной воде, дозы вводимых реагентов и экологических требований к продувочной воде, сбрасываемой в природные водоемы. Названные факторы могут изменяться в зависимости от электростанции и вида ВХР. Поэтому для выбора наиболее рационального (или оптимального) водно-химического режима необходимо проводить стендовые исследования, максимально приближенные к конкретным условиям эксплуатации СОО электростанции. Для этого необходимо разработать мобильную установку, на которой можно проводить исследования непосредственно на воде и в условиях работы СОО данной электростанции. Наряду с этим следует отметить необходимость увеличения объема химического контроля качества добавочной и циркуляционной воды, желательно с использованием автоматического химического контроля.

Методика исследования качества конденсата пара по измерениям удельной электропроводности. Для моделирования питательной, котловой воды и конденсата пара котлов-утилизаторов энергоблоков ПГУ требуется высокочистая вода с удельной электропроводностью менее 0,2 мкСм/см (в ряде опытов – менее 0,1 мкСм/см). В поток такой «чистой» воды с температурой в пределах 15–35 °С требуется дозировать различные реагенты (аммиак, уксусную или угольную кислоту, едкий натр и др.) для моделирования конкретной среды охлажденных проб водного теплоносителя с последующим измерением в проточной ячейке (без контакта с воздухом) удельной электропроводности и pH прямой и Н-катионированной проб. Полученные значения используются в качестве входных данных расчетного алгоритма концентраций отдельных ионных примесей, отвечающих нормативным требованиям [2]. Для реализации задачи в лабораторных условиях разработан экспериментальный стенд [10]. Лабораторный стенд «Установка обратного осмоса и химического обессоливания» выполнен на основе заводской установки ИСТОК-4М/Е (производство ОАО «Медиана-фильтр» г. Москва). Технологическая схема экспериментального стенда показана на рис. 1.

¹ Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго России. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003; СТО 0238424.27.100.013-2009. Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования. Стандарт организации. – М.: НП «ИнВЭЛ», 2009. – 93 с.

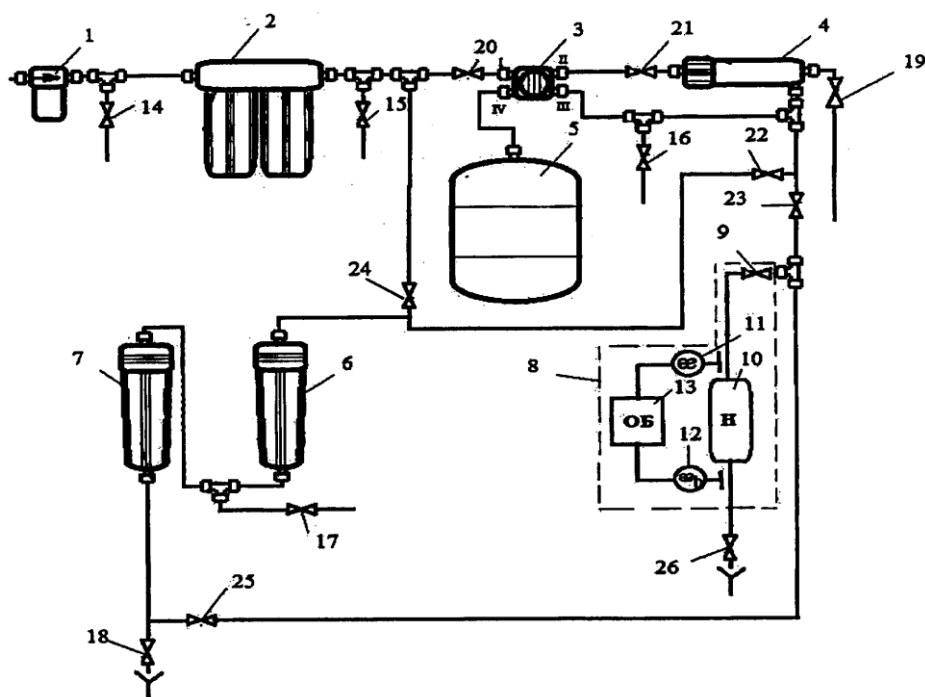


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – питательный насос; 2 – механический фильтр; 3 – четырехходовой переключатель потока; 4 – мембранный обратноосмотический фильтр; 5 – накопительный бак; 6 – Н-катионитный фильтр; 7 – ОН-анионитный фильтр; 8 – автоматический измерительный блок; 9 – кран, регулирующий расход пробы; 10 – Н-катионитная колонка; 11 – первый датчик электропроводности; 12 – второй датчик электропроводности; 13 – обрабатывающий блок; 14–18 – задвижки отбора пробы жидкости; 19–26 – задвижки

Исходная вода под давлением питательного насоса 1 прокачивается последовательно через механический фильтр 2 и через четырехходовой переключатель потока 3, поступает в мембранный обратноосмотический фильтр 4, где разделяется на пермеат и концентрат. Концентрат при открытой задвижке 19 сбрасывается в дренаж или идет на лабораторный анализ. Пермеат при закрытой задвижке 23 собирается в накопительном баке 5, а при открытой задвижке 22 поступает последовательно в Н-катионитный фильтр 6 и в ОН-анионитный фильтр 7, затем в автоматический измерительный блок 8. Посредством задвижек отбора пробы 14, 15, 16, 17 и 18 отбирают пробы воды для лабораторного анализа, результаты автоматического анализа получают с обрабатывающего блока 13. Очищенную воду при открытой задвижке 22 и закрытой задвижке 23 постепенно накапливают в накопительном баке 5. Подачу очищенной воды через мембранный обратноосмотический фильтр 4 или из накопительного бака 5 осуществляют посредством четырехходового переключателя потока 3. Особенностью установки является использование измерительного блока 8. Например, результаты измерений

удельной электропроводности обессоленной воды составили: $\chi^{25} = 0,15$ мкСм/см (показания датчика электропроводности 11 – проба воды до Н-катионитной колонки); $\chi_{\text{Н}}^{25} = 0,24$ мкСм/см (показания датчика электропроводности 12 – проба воды после Н-катионитной колонки).

Обработка данных автоматическим обрабатывающим блоком 13 по способу определения рН малобуферных предельно разбавленных водных растворов типа конденсата (патент на изобретение RU №2573453, 2016 г.) [11] дала следующие результаты:

- значение рН = 6,73;
- концентрация хлорид-иона $[\text{Cl}^-] = 15,4$ мкг/дм³;
- концентрация гидрокарбонат-иона $[\text{HCO}_3^-] = 20,5$ мкг/дм³;
- концентрация натрия $[\text{Na}^+] = 15,6$ мкг/дм³.

Представленная лабораторная установка может использоваться для решения широкого круга задач. Здесь представлена задача определения рН, концентрации этаноламина (ЭТА) и аммиака в конденсате пара по измерениям удельной электропроводности прямой (χ) и Н-катионированной ($\chi_{\text{Н}}$) пробы.

Вывод уравнения расчета pH конденсата пара и питательной воды по измерениям удельной электропроводности (χ и χ_H) состоит из ряда преобразований обобщенной системы уравнений [12].

Способ основан на расчете ионных равновесий в потоке пробы конденсата или питательной воды, проходящей через кондуктометрические датчики до Н-катионитовой колонки (χ) и после нее (χ_H). При значениях pH $\geq 9,0$ в условиях дозирования аммиака может быть использовано простое расчетное выражение

$$\text{pH} = -\lg(2,72 \cdot 10^{-9} / \chi), \quad (1)$$

полученное без учета уголекислоты и солевых примесей питательной воды, концентрация которых может быть определена в расчете на NaCl (мкг/дм³) выражением

$$C_{\text{NaCl}} = 137 \cdot (\chi_H - 0,056). \quad (2)$$

При дозировании аммиака в питательную воду значение pH во всем возможном диапазоне может определяться выражением, учитывающим солевую составляющую:

$$\text{pH} = 8 + \lg(3,68 \cdot \chi - 1,1 \cdot \chi_H - 1,9 \cdot \chi_H^2), \quad (3)$$

где χ и χ_H – значение удельной электропроводности в охлажденном потоке пробы до Н-колонки и после нее, приведенные к температуре 25 °С, мкСм/см.

Отмеченное выше иллюстрируется данными табл. 1, полученными при проведении опытов на лабораторном стенде.

Измерения значений pH лабораторным pH-метром с проточной ячейкой при калибровке в потоке обессоленной воды дали в первом опыте значение pH = 9,47, в опыте №3 – pH = 7,99.

Концентрация аммиака (мкг/дм³) в этом случае может быть определена выражением

$$C_{\text{NH}_3} = 62,6 \cdot \chi + 13,1 \cdot \chi^2. \quad (4)$$

В отсутствии подщелачивающего агента расчет pH по измерениям χ и χ_H усложняется необходимостью учета сво-

бодной и связанной уголекислоты, наряду с солевой компонентой.

Изложенный способ реализован в конструкции нового автоматического анализатора примесей конденсата и питательной воды «Лидер-АПК» и проверен в условиях эксплуатации на Петрозаводской ТЭЦ и Костромской ГРЭС.

В условиях дозирования в питательную воду этаноламина (ЭТА) и аммиака (NH₃) можно отметить следующее.

Согласно [3], при измерениях в охлажденных пробах при температурах, близких к 25 °С, имеем следующие значения констант диссоциации:

– аммиак (NH₃+H₂O) – $K_d = 1,76 \cdot 10^{-5}$ (pK = 4,755);

– этаноламин (H₂NCH₂CH₂OH+H₂O) – $K_d = 1,80 \cdot 10^{-5}$ (pK = 4,75).

Это означает, что концентрации ионов OH⁻, а следовательно, pH, сильно-разбавленных водных растворов равных концентраций будут одинаковыми (при $t = 25$ °С) при примерно равном вкладе ионов в измеренную величину удельной электропроводности (χ).

Согласно [4], в условиях «котловой воды» парогенератора при температурах, близких к 300 °С, коэффициент распределения примеси между паром и водой составляет:

– аммиак – $K_p = 3,23$;

– этаноламин – $K_p = 0,66$.

То есть, реальные концентрации в «котловой воде солевого отсека» составляют:

– аммиак – около 10 % от суммарно возможной (вода+пар) концентрации;

– этаноламин – около 90 %.

Последнее означает, что в котловой воде останется в основном этаноламин в суммарной концентрации (с остатками аммиака), примерно равной концентрации ЭТА упаренной питательной воды, а в паре будет аммиак и ЭТА в суммарной концентрации, определяемой условиями парообразования в парогенераторе.

Таблица 1. Расчетные значения pH потока воды с дозировкой аммиака по измерениям удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы

№ опыта	Измеренные значения		Расчетные значения	
	χ^{25} , мкСм/см	χ_H^{25} , мкСм/см	pH (формула 1)	pH (формула 3)
1	8,04	0,19	9,47	9,47
2	2,04	0,258	8,87	8,85
3	0,28	0,08	8,01	7,97

Таким образом, измеряя удельную электропроводность χ и χ_{H} в охлажденных пробах по методике ИГЭУ, можно рассчитать: рН и суммарную концентрацию ($\text{NH}_3 + \text{ЭТА}$) в питательной воде и паре; рН и концентрацию аммиака, равную в пределах 10 %-го отклонения; концентрации аммиака в питательной воде. Такая зависимость заложена в расчетную часть анализатора «Лидер-АПК» [11].

Возможность использования анализатора «Лидер-АПК» для контроля концентраций аммиака, этаноламина и раствора их смеси, приготовленных на глубокообессоленной воде ($\chi_{\text{H}_2\text{O}}^{25} < 0,1$ мкСм/см), проверялась в лабораторных условиях на мембранно-ионообменном стенде (рис. 1). Некоторые результаты приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов (табл. 2) показывает, что в монорастворах аммиака и этаноламина и в растворе их смеси возможно косвенное (расчетное) определение их концентраций (для раствора смеси $\text{NH}_3 + \text{ЭТА}$ в пересчете на аммиак) по измерениям удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы с ошибкой менее 10 %, что можно считать приемлемым для условий оперативного химического контроля.

Методика исследования качества циркуляционной воды системы оборотного охлаждения конденсатора паровой турбины. Методика исследований эффективности водно-химических режимов СОО конденсаторов паровых турбин и использован-

ная установка представлены в [13]. Особенностью установки является ее мобильность и возможность использования непосредственно в производственных условиях при питании той же водой, которая используется для восполнения потерь циркуляционной воды системы электростанции.

Во время всех стендовых испытаний должен осуществляться периодический контроль качества оборотной и подпиточной воды по следующим показателям: рН; удельная электропроводность; жесткость общая; жесткость кальциевая; щелочность общая; щелочность по фенолфталеину; содержание общего железа, хлоридов, сульфатов, меди, органических фосфатов и др.

Большой объем химического контроля качества добавочной и циркуляционной воды ограничивает оперативность исследований и требует больших трудозатрат. Возможность сокращения лабораторного химического контроля (ЛХК) может быть получена за счет дополнения к означенным приборным измерениям электропроводности (χ) и рН показателя χ_{H} – удельной электропроводности Н-катионированной пробы. При кратковременных включениях Н-колоники в поток пробы (до 10–15 минут) и объеме катионита 1,0–1,5 л измерения показателя χ_{H} реализуются в течение всего эксперимента без замены (регенерации) катионита в Н-колонке. В этом случае может быть использован метод косвенного (расчетного) определения концентраций ионогенных примесей [12, 14].

Таблица 2. Расчетные определения рН и концентраций модельных растворов аммиака (NH_3), этаноламина (ЭТА) и их смеси ($\text{NH}_3 + \text{ЭТА}$) в пересчете на NH_3 по измерениям электропроводности прямой (χ , мкСм/см) и Н-катионированной (χ_{H} , мкСм/см) пробы

Вещество	Концентрация модельных растворов		Измерения удельной электропроводности		Расчет по методике «Лидер-АПК»		
	мкг/дм ³	мкмоль/дм ³ (сумма)	χ^{25}	χ_{H}^{25}	рН	Концентрация модельных растворов	
						мкг/дм ³	мкмоль/дм ³ (сумма)
NH_3	305	17,9	2,85	0,308	8,96	301	17,7
	610	35,9	4,52	0,363	9,22	571	33,6
ЭТА	517	8,48	1,64	0,325	8,75	524	8,59
	1034	17,0	2,87	0,342	8,95	1087	17,8
	4136	67,8	7,13	0,409	9,42	4194	68,8
$\text{NH}_3 + \text{ЭТА}$	732+413	49,8	5,48	0,377	9,25	На NH_3	45,6
	1472+1664	113,9	9,98	0,398	9,58	770 1952	114,8

Анализ ионных равновесий в добавочной и циркуляционной воде позволяет представить результат преобразования математического описания в следующем виде:

$$[Cl^-]_{\text{усл}} = \frac{1000 \cdot \chi_{\text{H}}}{(\lambda_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-})}; \quad (5)$$

$$[HCO_3^-] = \frac{1000 \cdot \chi}{(\lambda_{\text{cp}} + \lambda_{\text{HCO}_3^-})} - [Cl^-]_{\text{усл}}; \quad (6)$$

$$[H_2CO_3] = 2,2 \cdot 10^{6-\text{pH}} \cdot [HCO_3^-]; \quad (7)$$

$$[CO_3^{2-}] = 4,8 \cdot 10^{\text{pH}-11} \cdot [HCO_3^-]; \quad (8)$$

$$\text{Щ}_0 = ([HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + 10^{\text{pH}-14}) \cdot 10^3, \quad (9)$$

где $[Cl^-]_{\text{усл}} = [Cl^-] + [SO_4^{2-}]$ – суммарная концентрация хлоридов и сульфатов в воде, моль/дм³; $[HCO_3^-]$, $[CO_3^{2-}]$, $[H_2CO_3]$ – формы диссоциации углекислоты по первой и второй ступеням и концентрация «свободной» углекислоты, моль/дм³; χ , χ_{H} – измеренные при 25 °С значения удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы, См/см; λ_{H^+} , λ_{Cl^-} , $\lambda_{\text{HCO}_3^-}$, λ_{cp} – эквивалентные электропроводности ионов H^+ , Cl^- , HCO_3^- и среднее значение подвижностей ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , $\text{Oм}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{моль}(\text{экв})^{-1}$, при температуре 25 °С и фактической ионной силе водного раствора.

Значения λ_i могут быть определены согласно [12] или опытным путем по значению подвижности λ_{0i} предельно разбавленных растворов ($\lambda_{0,\text{H}^+} = 349,8$, $\lambda_{0,\text{Cl}^-} = 76,4$, $\lambda_{0,\text{HCO}_3^-} = 44,5$, $\lambda_{0,\text{cp}} = 70$) с учетом их изменения с ростом ионной силы (концентрации) согласно закону Кольрауша: $\lambda_i = \lambda_{0,i} - a \cdot \sqrt{C}$.

При измерениях по методикам лабораторного химического контроля (ЛХК) значений общей жесткости (Ж_0) и кальциевой жесткости (Ж_{Ca}) в добавочной (д) и циркуляционной (ц) воде могут быть оперативно определены основные показатели качества

ведения ВХР СОО: $K_y^{\text{Cl}} = \frac{[Cl^-]_{\text{ц}}}{[Cl^-]_{\text{д}}}$ – коэффи-

циент упаривания по хлоридам (и сульфатам) в циркуляционной воде ($[Cl^-]_{\text{ц}}$) по от-

ношению к добавочной воде ($[Cl^-]_{\text{д}}$);

$K_y^{\text{Ж}_{\text{Ca}}} = \frac{\text{Ж}_{\text{Ca,ц}}}{\text{Ж}_{\text{Ca,д}}}$ – коэффициент упаривания по

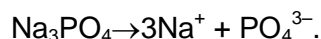
кальциевой жесткости; $T = \frac{K_y^{\text{Ж}_{\text{Ca}}}}{K_y^{\text{Cl}}} \cdot 100\%$ – по-

казатель «транспорт кальция»; $\Delta \text{Ж}_0 = (\text{Ж}_0)_{\text{ц,расч}} - \text{Ж}_{0,\text{ц}}$ – показатель надежности водно-химического режима, отвечающий условию $\Delta \text{Ж}_0 < 0,3$ мг-экв/дм³, $(\text{Ж}_0)_{\text{ц, расч}} = K_y^{\text{Cl}} \cdot \text{Ж}_{0,\text{д}}$. Расчет технологических показателей приведен в [13].

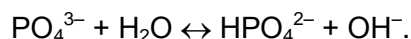
Возможность использования измерения удельной электропроводности прямой (χ , мкСм/см) и Н-катионированной (χ_{H} , мкСм/см) пробы для контроля качества добавочной воды СОО проверялась на лабораторном стенде в разбавленных растворах смеси электролитов Na_3PO_4 и NaCl .

Такой случай может иметь место при восполнении потерь циркуляционной воды маломинерализованной водой с добавкой продувки котловой воды солевого отсека. Алгоритм расчета основан на следующем.

В исходной пробе NaCl и Na_3PO_4 как сильные электролиты диссоциируют полностью по реакциям:



Гидролиз ионов PO_4^{3-} идет почти на 100 % по реакции



Тогда равновесные концентрации ионов соответственно равны, моль/дм³:

$$C_{\text{Cl}^-}^{\text{p}} = C_{\text{NaCl}};$$

$$C_{\text{HPO}_4^{2-}}^{\text{p}} = C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}};$$

$$C_{\text{Na}^+}^{\text{p}} = C_{\text{NaCl}}^{\text{исх}} + 3 \cdot C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}};$$

$$C_{\text{OH}^-}^{\text{p}} = C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}}.$$

Уравнение электронейтральности имеет вид

$$C_{\text{Na}^+}^{\text{p}} = C_{\text{Cl}^-}^{\text{p}} + 2 \cdot C_{\text{HPO}_4^{2-}}^{\text{p}} + C_{\text{OH}^-}^{\text{p}} = C_{\text{NaCl}}^{\text{исх}} + 3 \cdot C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}}. \quad (10)$$

Уравнение электропроводности имеет вид

$$1000 \cdot \chi = \lambda_{\text{Na}^+} (C_{\text{NaCl}}^{\text{исх}} + 3C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}}) + \lambda_{\text{Cl}^-} C_{\text{NaCl}}^{\text{исх}} + \lambda_{\text{HPO}_4^{2-}} \cdot 2 C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}} + \lambda_{\text{OH}^-} \cdot 3 C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}}. \quad (11)$$

В Н-катионированной пробе ионы Na^+ обмениваются на ионы H^+ , тогда концентрация ионов водорода с учетом перехода $\text{PO}_4^{3-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{PO}_4^-$ составит $C_{\text{H}^+, \text{H}} = C_{\text{Na}^+}^p = C_{\text{NaCl}}^{\text{исх}} + C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}}$.

При $K_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ получается соотношение $\frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{2,41 \cdot 10^{-5}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{PO}_4^-}^p}{C_{\text{H}_3\text{PO}_4}^p} = 311 \gg 100$.

В этом случае диссоциацию H_3PO_4 можно считать полной по 1 ступени.

Тогда

$$1000 \cdot \chi_{\text{H}} = \lambda_{\text{H}^+} C_{\text{H}^+, \text{H}}^p + \lambda_{\text{Cl}^-} C_{\text{NaCl}}^{\text{исх}} + \lambda_{\text{H}_2\text{PO}_4^-} C_{\text{PO}_4^{3-}}^{\text{исх}} \quad (12)$$

В табл. 3 представлены результаты измерений и расчета удельной электропроводности проб воды по известным концентрациям Na_3PO_4 и NaCl .

Таблица 3. Результаты измерений и расчета электропроводности при дозировании в пробу смеси электролитов Na_3PO_4 и NaCl

Концентрация электролитов		Измеренные значения		Расчетные значения	
Na_3PO_4 , мг/дм ³	NaCl , мг/дм ³	χ , мкСм/см	χ_{H} , мкСм/см	χ , мкСм/см	χ_{H} , мкСм/см
0,52	1,09	3,41	6,52	4,89	10,05
2,27	1,12	11,60	18,21	13,48	17,38
5,59	1,10	23,43	28,88	29,60	30,72
5,85	3,46	29,39	46,16	35,97	48,96

Обратный расчет концентраций солевых примесей по измеренным значениям χ , χ_{H} и pH возможен для приведенного примера и более сложных растворов при известном составе солевых компонентов и значениях эквивалентных электропроводностей отдельных ионов.

Выводы. Приведенная методика позволяет использовать представленные установки для исследования качества воды и состояния водно-химического режима как конденсата отработанного пара, так и охлаждающей воды в конденсаторах паровых турбин ТЭС.

Использование приборных измерений удельной электропроводности и pH позволяет сократить объем лабораторного химического контроля водных сред, повысить оперативность и информативность результатов измерений.

Список литературы

1. **Мостофин А.А.** Влияние температуры на определение pH и CO_2 в питательной воде прямоточных парогенераторов // Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках: сб. ст. Вып. 6. – М.: Энергия, 1978. – С. 195–199.
2. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Совершенствование водно-химических режимов и химконтроля на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 2010. – № 7. – С. 2–6.
3. **Galt K.J.** Etanolamine Experience at Koeberg Nuclear Power Station. South Africa. Int.

Conf. Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems. Chimie. 2002. – Avignon, 2002.

4. **Репин Д.А., Петрова Т.И.** Влияние ОЭДФК и Хеламина на работу катионитных фильтров // XV Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тез. докл. – М., 2009. – Т. 3. – С. 172–173.

5. **Петрова Т.И., Репин Д.А.** Факторы, влияющие на работу оборотных систем охлаждения тепловых электростанций // Вестник МЭИ. – 2009. – № 1. – С. 106–111.

6. **Бондарь Ю.Ф.** Оптимизация водно-химического режима оборотных систем охлаждения с градирнями // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – № 3. – С. 8–10.

7. **Некоторые** особенности и свойства комплексных реагентов на основе аминов и водно-химический режим / С.Ю. Суслов, А.В. Кирилина, И.А. Сергеев и др. // Энергетик. – 2013. – № 2.

8. **Современное** состояние разработок биоразлагаемых ингибиторов солеотложений для различных систем водопользования / К.И. Попов, Н.Е. Ковалева, Г.Я. Рузакова и др. // Теплоэнергетика. – 2016. – № 2. – С. 46–53.

9. **Silhanek J.** Comparisons of the most important chemical databases – SciFinder and Reaxys database systems // Chemicke Listy. – 2014. – Vol. 108, № 1. – Р. 83–90.

10. **Пат. 2658020** Российская Федерация. Лабораторная установка обратного осмоса и химического обессоливания / А.Б. Ларин, Д.С. Трухин, А.Я. Сорокина, Н.В. Власов; опубл. 19.06.2018; Бюл. № 17.

11. **Измерение pH** в условиях сверхкритической среды конденсата и питательной воды энергоблоков / А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, А.Я. Со-

рокина, С.В. Кьет // Теплоэнергетика. – 2018. – № 11. – С. 97–102.

12. **Ларин Б.М., Бушуев Е.Н.** Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009.

13. **Козловский В.В., Ларин А.Б.** Методика исследования состояния водного режима системы оборотного охлаждения на ТЭС // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 3. – С. 14–21.

14. **Свидетельство** РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610800. Расчет удельной электропроводности и технологических вод ТЭС / Е.Н. Бушуев, Б.М. Ларин, А.Б. Ларин; заявл. 20.11.2014.; опубл. 20.02.2015.

References

1. Mostofin, A.A. Vliyanie temperatury na opredelenie pH i CO₂ v pitatel'noy vode pryamotoknykh parogeneratorov [Influence of temperature on determination of pH and CO₂ in feed water of straight-flow steam generators]. *Sbornik statey «Vodopodgotovka, vodnyy rezhim i khimkontrol' na parosilovyykh ustanovkakh»*. Vypusk 6 [Collection of articles «Water treatment, water regime and chemical control on steam power plants», issue 6]. Moscow: Energiya, 1978, pp. 195–199.

2. Voronov, V.N., Petrova, T.I. Sovershenstvovanie vodno-khimicheskikh rezhimov i khimkontrolya na teplovykh elektrostantsiyakh [Improvement of water-chemical modes and chemical control at thermal power plants]. *Teploenergetika*, 2010, no. 7, pp. 2–6.

3. Galt, K.J. Etanolamine Experience at Koeberg Nuclear Power Station. South Africa. Int. Conf. Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems. Chimie. 2002. Avignon, 2002.

4. Repin, D.A., Petrova, T.I. Vliyanie OEDFC i Khelamina na rabotu kationitnykh fil'trov [Influence of OEDFC and Chelamine on the work of cationic filters]. *Tezisy dokladov XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Abstracts of the XV International scientific and technical conference of students and postgraduates]. Moscow, 2009, vol. 3, pp. 172–173.

5. Petrova, T.I., Repin, D.A. Faktory, vliyayushchie na rabotu oborotnykh sistem okhlazhdeniya teplovykh elektrostantsiy [Factors affecting the operation of circulating cooling systems of thermal power plants]. *Vestnik MEI*, 2009, no. 1, pp. 106–111.

6. Bondar', Yu.F. Optimizatsiya vodno-khimicheskogo rezhima oborotnykh sistem okhlazhdeniya s gradirnyami [Optimization of water-

chemical regime of circulating cooling systems with cooling towers]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2008, no. 3, pp. 8–10.

7. Suslov, S.Yu., Kirilina, A.V., Sergeev, I.A., Sokolova, E.A., Suslov, I.S., Suslov, P.S. Nekotorye osobennosti i svoystva kompleksnykh reagentov na osnove aminov i vodno-khimicheskiy rezhim [Some features and properties of complex reagents based on amines and water-chemical regime]. *Energetik*, 2013, no. 2.

8. Popov, K.I., Kovaleva, N.E., Ruzakova, G.Ya., Kombarova, S.P., Larchenkov, V.E. Sovremennoe sostoyanie razrabotok biorazlagaemykh ingibitorov soleotlozheniy dlya razlichnykh sistem vodopol'zovaniya [Current state of development of biodegradable salt deposition inhibitors for various water use systems]. *Teploenergetika*, 2016, no. 2, pp. 46–53.

9. Silhanek, J. Comparisons of the most important chemical databases-SciFinder and Reaxys database systems. *Chemicke Listy*, 2014, vol. 108, no. 1, pp. 83–90.

10. Larin, A.B., Trukhin, D.S., Sorokina, A.Ya., Vlasov, N.V. *Laboratornaya ustanovka obratnogo osmosa i khimicheskogo obessolivaniya* [Laboratory installation of reverse osmosis and chemical desalination]. Patent RF, no. 2658020, 2018.

11. Larin, A.B., Larin, B.M., Sorokina, A.Ya., Kiet, S.V. Izmerenie pH v usloviyakh sverkhchistoy sredy kondensata i pitatel'noy vody energoblokov [Measurement of pH in the conditions of ultra-pure medium of condensate and feed water of power units]. *Teploenergetika*, 2018, no. 11, pp. 97–102.

12. Larin, B.M., Bushuev, E.N. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov obrabotki teploносителя na TES i AES* [Fundamentals of mathematical modeling of chemical and technological processes of heat carrier treatment at TPP and NPP]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2009.

13. Kozlovskiy, V.V., Larin, A.B. Metodika issledovaniya sostoyaniya vodnogo rezhima sistemy oborotnogo okhlazhdeniya na TES [Methodology for studying the state of the water regime of the circulating cooling system at TPP]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 3, pp. 14–21.

14. Bushuev, E.N., Larin, B.M., Larin, A.B. *Raschet udel'noy elektroprovodnosti i tekhnologicheskikh vod TES* [Calculation of specific electrical conductivity and process water of TPP]. Svidetel'stvo RF o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM [Certificate of the Russian Federation on state registration of computer programs], no. 2015610800, 2015.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.321

Ольга Сергеевна Мельникова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Михаил Вячеславович Прусаков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: mprab3@mail.ru

Александр Алексеевич Жолобов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-03.

Исследование влияния волокон целлюлозы на электрическую прочность трансформаторного масла

Авторское резюме

Состояние вопроса. Электрическая прочность трансформаторного масла является первым параметром при испытаниях изоляции трансформаторов. Такие испытания производятся в стандартном разряднике по значениям пробивных напряжений. Резкое снижение электрической прочности имеет место при загрязнении масла механическими примесями. Наибольшее влияние на напряженность электрического поля оказывают волокна целлюлозы, которые обладают повышенной проводимостью, образование мостика из них особенно сильно искажает поле между электродами. В то же время влияние таких частиц не учитывается при испытаниях. Сложность заключается в том, что экспериментально трудно определить влияние таких примесей на пробивную напряженность. В связи с этим в исследованиях поставлены и решены задачи по определению электрической прочности трансформаторного масла в стандартном разряднике при наличии волокон целлюлозы.

Материалы и методы. Для моделирования напряженностей электрического поля использован программный комплекс ANSYS. За основу 3D модели была принята стандартная измерительная ячейка для определения пробивного напряжения, построенная с учетом граничных условий в форме куба, в котором находится электродная система, и учитывающая значения напряженности электрического поля в центре электродной системы.

Результаты. Проведены расчеты напряженности электрического поля между электродами с учетом влияния повышенной проводимости волокон целлюлозы. Показано существенное влияние на снижение электрической прочности масляных промежутков увлажненных волокон длиной более 200 мкм, что при проведении испытаний трансформаторного масла на пробой в стандартной ячейке не учитывается и приводит к снижению точности результатов определения электрической прочности трансформаторного масла в действующем оборудовании.

Выводы. Результаты исследования могут быть использованы эксплуатационными службами для улучшения оценки качества трансформаторного масла, используемого в силовых трансформаторах в качестве изоляции. Также полученные результаты могут быть использованы при исследованиях механизмов электрофизических процессов, происходящих в жидких диэлектриках, при наличии волокон.

Ключевые слова: трансформаторное масло, пробивное напряжение, электрическая прочность, напряженность электрического поля, волокна целлюлозы

Olga Sergeevna Melnikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor of the high-voltage electric power engineering, electrotechnics and electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Mikhail Vyacheslavovich Prusakov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor of the high-voltage electric power engineering, electrotechnics and electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: mprab3@mail.ru

Alexander Alekseyevich Zholobov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnology, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-03.

Study of the effect of cellulose fibers on the electrical strength of transformer oil

Abstract

Background. The electrical strength of transformer oil is the first parameter in transformer insulation tests. Such tests are carried out in a standard discharger according to the values of breakdown voltage. An abrupt decrease in electrical strength occurs when oil is contaminated with mechanical impurities. The greatest influence on the electric field is exerted by highly conductive cellulose fibers. The field between the electrodes may be severely distorted by a «bridge» of such fibers. At the same time, the influence of such particles is not taken into account in the tests. The problem is to experimentally determine the effect of such impurities on the breakdown strength. Thereby, this research poses and solves the problem of determining the dielectric strength of transformer oil in a standard discharger in the presence of cellulose fibers.

Materials and methods. To simulate electric field strengths, the ANSYS software package has been used. The basis of the 3D model was a standard measuring cell for determining breakdown voltage, which takes into account the boundary conditions in the form of a cube in which the electrode system is located, and the values of the electric field strength in the center of the electrode system.

Results. The electric field tension between the electrodes has been calculated, taking into account the influence of increased conductivity of cellulose fibers. It has been found that the electrical strength of oil gaps of moistened fibers with a length of more than 200 μm is significantly reduced, which is not taken into account when testing transformer oil for breakdown in a standard cell. This leads to inaccuracy in determining the electric strength of transformer oil in existing equipment.

Conclusions. The results of the study can be used by operational services to improve the assessment of the quality of transformer oil used in power transformers as insulation. The results also can be used to study the mechanisms of electrophysical processes occurring in liquid dielectrics in the presence of fibers.

Key words: transformer oil, breakdown voltage, electric strength, electric field strength, cellulose fiber

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.023-033

Введение. Электрическая прочность трансформаторного масла – один из важных параметров при диагностике изоляции силовых трансформаторов [1]. Нарушение электрической прочности масло-барьерной изоляции приводит к необратимым последствиям работы трансформатора в целом [2, 3]. В соответствии с РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испы-

таний электрооборудования»¹, определение среднего пробивного напряжения является первым параметром при испытаниях трансформаторного масла. Такие испытания производятся в стандартном разряд-

¹ РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – Изд. 6-е, с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.

нике по значениям пробивных напряжений в соответствии с ГОСТ 6581-75². Кроме того, по ГОСТ 6581-75 определяется коэффициент вариации, который показывает разброс значений пробивных напряжений относительно среднего значения. Коэффициент вариации, в соответствии с ГОСТ 6581-75, определяется для всех электротехнических жидкостей, и его значение не должно превышать 20 %, в то время как для технически чистого трансформаторного масла этот коэффициент составляет 10–15 % [4]. В соответствии с американским стандартом ASTM D1816-67 (1971)³, который предусматривает определение пробивных напряжений только для нефтяных масел, этот коэффициент составляет 6 % [5]. Механизм пробоя трансформаторного масла имеет статистический характер, и, например, если значения пробивного напряжения соответствуют нормативным значениям, а коэффициент вариации имеет достаточные значения, это говорит о наличии механических примесей в трансформаторном масле [6].

На пробивное напряжение трансформаторного масла оказывают влияние как размер частиц, так и их проводимость и диэлектрическая проницаемость. Наличие твердых примесей сильно снижает пробивное напряжение трансформаторного масла. Твердые частицы, диэлектрическая проницаемость которых больше диэлектрической проницаемости масла, втягиваются в область наиболее сильного поля, образуют мостики, которые способствуют пробоям. Наличие частиц, мостиков и отдельных цепочек сильно искажает поле между электродами, и пробой трансформаторного масла происходит в резко неоднородном поле, что ведет к снижению пробивного напряжения [7].

Наибольшее влияние на напряженность электрического поля оказывают проводящие металлические частицы, однако наиболее распространенными механическими частицами примесей являются

увлажненные волокна и графит (углерод). Волокна в трансформаторном масле появляются из-за отрыва частиц от твердых баггеров из электротехнического картона на стадиях изготовления, а также в процессе эксплуатации трансформаторов при непрерывной циркуляции масла и при старении изоляции.

Если жидкость сильно загрязнена твердыми частицами, то образование мостика происходит сравнительно быстро, за время около секунды или нескольких секунд. Резкое снижение электрической прочности имеет место при загрязнении жидкости влажными волокнами. Такие волокна обладают повышенной проводимостью, образование мостика из них особенно сильно искажает поле между электродами. Если мостик соприкасается с одним из электродов, это приводит к уменьшению расстояния между электродами. В случае сухих волокон мостики имеют высокое сопротивление и в меньшей степени влияют на пробивное напряжение [7].

Определение допустимой пробивной напряженности на стадии проектирования трансформаторов в настоящее время определяется на моделях и сравнивается с расчетными значениями [8, 9], при этом влияние других факторов, таких как наличие примесей, не учитывают. Сложность заключается в том, что экспериментально трудно определить влияние номинальных напряжений и мощности трансформаторов, примесей на электрическую прочность масла и изоляции в целом, учесть объем масла между электродами. В настоящее время успехи в области развития численных методов расчетов электрических полей с применением компьютерных технологий позволяют рассчитать с достаточно высокой точностью заданные модели. Для расчетов электрической прочности трансформаторного масла в нашем исследовании использован программный комплекс ANSYS. В основе этой программы заложен численный метод конечных элементов, позволяющий рассчитать значения электрического поля в любой точке заданной геометрии [10].

В связи с этим в исследованиях поставлены и решены задачи по определению напряженности электрического поля в стандартном разряднике при наличии сухих и увлажненных волокон в зависимости от их размера, проводимости и расположения

² ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81). Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.

³ ASTM D1816-67 (1971, США). Метод определения пробивного напряжения нефтяных электроизоляционных масел с помощью VDE-электродов / Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов // перевод с англ. под ред. проф. Н.В. Александрова. – М.: Энергия, 1979.

относительно электродов, а также смоделированы цепочки из волокон в трансформаторном масле.

Методика исследования. За основу 3D модели принята стандартная измерительная ячейка для определения пробивного напряжения, геометрические размеры которой определены в соответствии с ГОСТ 6581-75. Сечение системы создано в AutoCAD (двух- и трехмерная система автоматизированного проектирования и черчения). Моделирование системы проведено в программном обеспечении Autodesk Inventor – система трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования (САПР), предназначенная для создания цифровых прототипов промышленных изделий. Для импорта в среду ANSYS Maxwell модель была упрощена. Оставлены только электроды. Это

возможно благодаря тому, что интересующие значения напряженности электрического поля находятся в центре электродной системы [7]. Для экспорта системы использован формат.sat (Standard ACIS Text). Файлы данного формата хранятся в текстовом формате ASCII. После импортирования модели в ANSYS Maxwell были заданы граничные условия в форме куба, в котором находится электродная система (рис. 1). Всем элементам заданы электрофизические характеристики соответствующих материалов, представленных в табл. 1. Электроды выполнены из меди. Куб вокруг электродов заполнен трансформаторным маслом. Марка трансформаторного масла ГК – наиболее часто применяемая в электрооборудовании высших классов напряжения.

Таблица 1. Электрофизические характеристики моделируемых трансформаторного масла и частиц

Материалы	Электрофизические характеристики	
	ε_r	ρ , Ом·м
Трансформаторное масло (ГК)	2,2	10^{12}
Волокна целлюлозы (картон для главной изоляции марки А) при $c_B = 1\%$	4	10^{12}
Волокна целлюлозы (картон для главной изоляции марки А) при $c_B = 6\%$	12	10^{10}

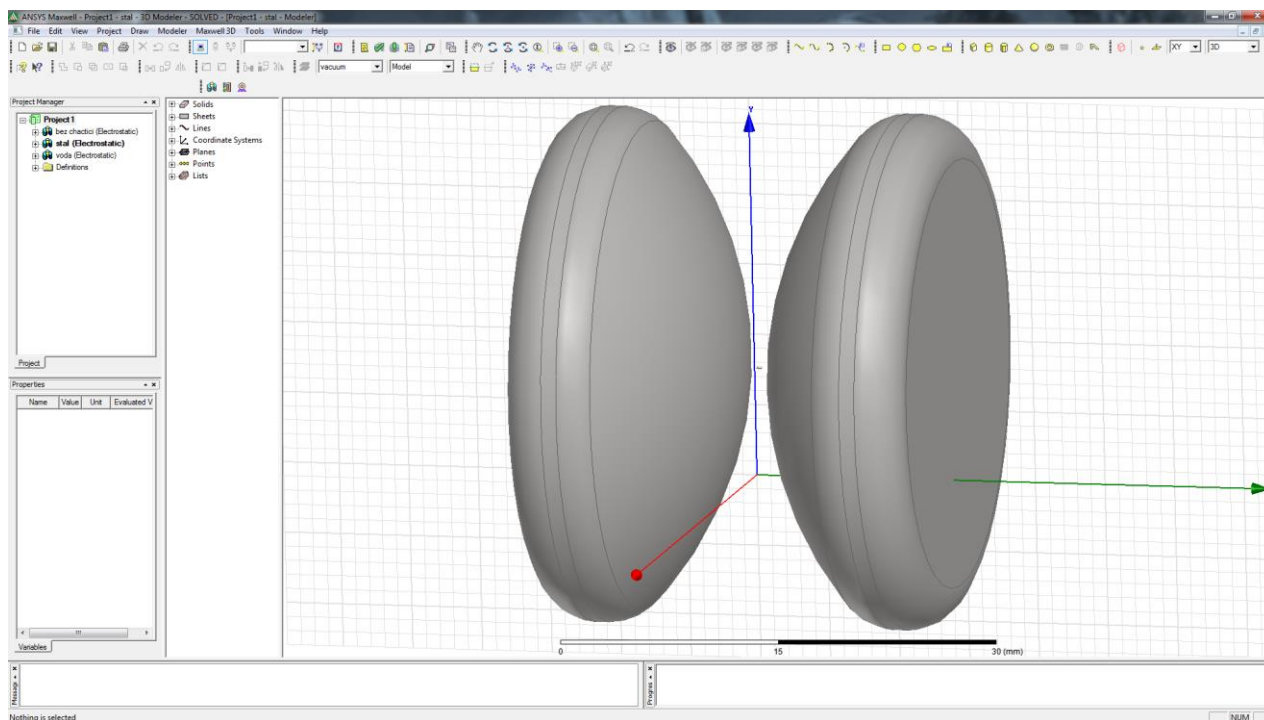


Рис. 1. Электродная система стандартного разрядника в среде ANSYS Maxwell

Между электродами системы располагались различные частицы. Были рассмотрены два типа волокон целлюлозы: увлажненные и сухие. Одному из электродов присвоено значение напряжения 40 кВ. Это напряжение является средним пробивным в стандартной измерительной ячейке для оборудования класса до 150 кВ в соответствии с РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Принятое в данных расчетах значение напряжения 40 кВ является таковым для эксплуатационного масла, допускаемого в работу в электрооборудовании в качестве изоляции. Второй электрод заземлен и напряжение на нем 0 кВ.

Для получения полной картины влияния частиц примесей на электрическое поле оценивалась напряженность в промежутке между электродами без частиц (рис. 2).

По графику, представленному на рис. 2, можно принять, что вдоль центральной оси системы поле слабо неоднородное. Значения от 0,5 до 3 мм – это напряженность электрического поля в трансформаторном масле. До и после этих значений находятся медные электроды, внутри медных электродов поле отсутствует [10]. Максимальная расчетная напряженность электрического поля достигает 16,62 кВ/мм у поверхности электрода с потенциалом 40 кВ.

Для того чтобы убедиться в достоверности результатов, полученных в ANSYS Maxwell, можно рассчитать предельно до-

пустимое среднее значение напряженности в системе с однородным электрическим полем. Напряжение – $U = 40$ кВ, расстояние между электродами в испытательной ячейке – $d = 2,5$ мм. Тогда

$$E_{\text{пр.доп}} = \frac{U}{d} = \frac{40}{2,5} = 16 \text{ кВ/мм} . \quad (1)$$

Результаты, полученные при расчете и моделировании, совпадают. Значит, можно считать модель достоверной. Для полного понимания необходимо провести расчет и по максимальным пробивным напряжениям.

Чистое трансформаторное масло может иметь напряжение пробоя вплоть до 80 кВ. Таким образом, его пробивная напряженность при пересчете по (1) составляет

$$E_{\text{max}} = \frac{U}{d} = \frac{80}{2,5} = 32 \text{ кВ/мм} . \quad (2)$$

Таким образом, при превышении E_{max} в промежутке будет пробой изоляции даже при меньшем напряжении (т.е. появление частицы может сильно повлиять на электрическую прочность).

Для исследования влияния волокон были созданы модели электродных систем с частицами разных размеров и при разном их положении между электродами, а также созданы модели с так называемыми цепочками, состоящими из волокон целлюлозы.

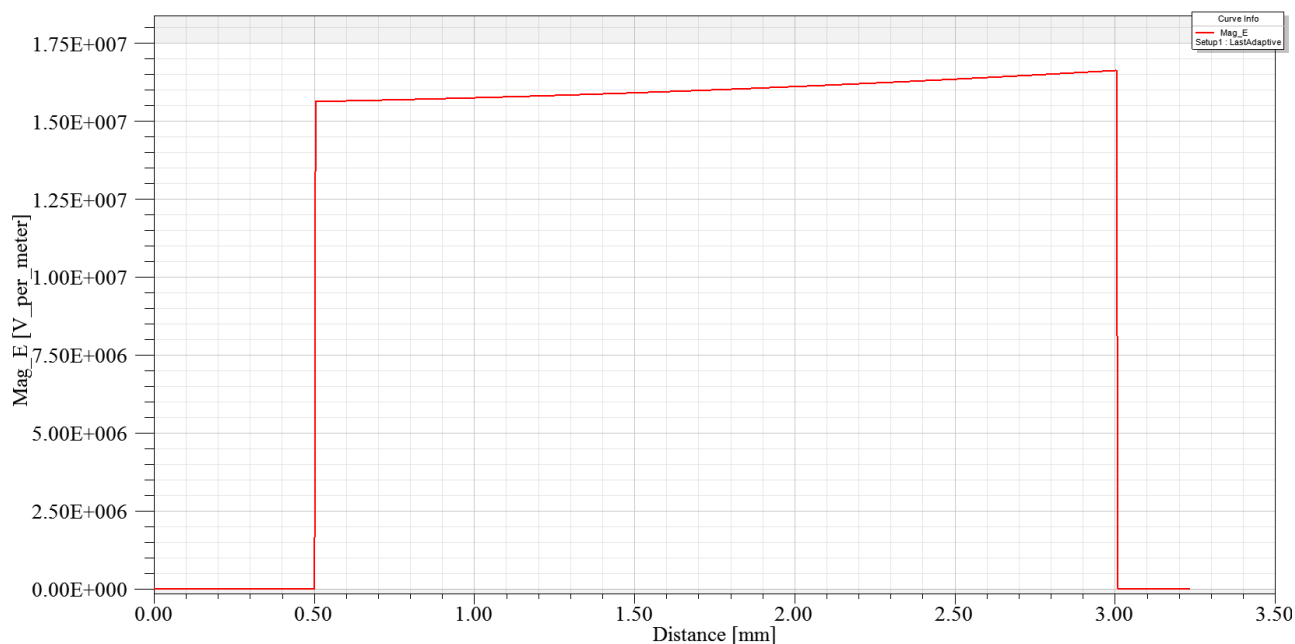


Рис. 2. Расчетный график напряженности поля вдоль оси системы без частиц

Для оценки влияния волокон целлюлозы были рассмотрены частицы при концентрации воды $C_B = 1\%$ (сухие волокна) и $C_B = 6\%$ (увлажненные волокна) и длина волокон изменялась от 100 до 400 мкм в соответствии с ГОСТ 17216-2001.

Результаты исследования. На рис. 3 представлен график изменения напряженности поля при наличии влажного волокна 400 мкм в середине электродной системы. Анализ графика показывает, что после введения частицы электрическое поле становится резко неоднородным; максимальная напряженность электрического поля наблюдаются на границе раздела жидкого диэлектрика и частицы.

Напряженность электрического поля вблизи электродов возросла, что не наблюдается в системе без частиц. Напряженность внутри частицы также присутствует.

Значения максимальной, средней и минимальной напряженностей электриче-

ского поля при расположении частицы в центре между электродами системы для сухих и увлажненных волокон представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов моделирования (рис. 4, 5) показывает, что увеличение максимальных значений напряженности над средней напряженностью (16 кВ/мм) чистого масляного промежутка у концов сухих волокон длиной 100 мкм составляет 23,88 %, 200 мкм – 46,44 %, 400 мкм – 46,69 %. Таким образом, сухие волокна длиной более 200 мкм слабо влияют на искажение напряженности электрического поля.

Увеличение максимальных значений напряженности над средней у концов влажных волокон длиной 100 мкм составляет 64 %, 200 мкм – 170,13 %, 400 мкм – 209,38 %. Здесь также отмечается снижение темпов роста напряженности электрического поля для волокон длиной более 200 мкм.

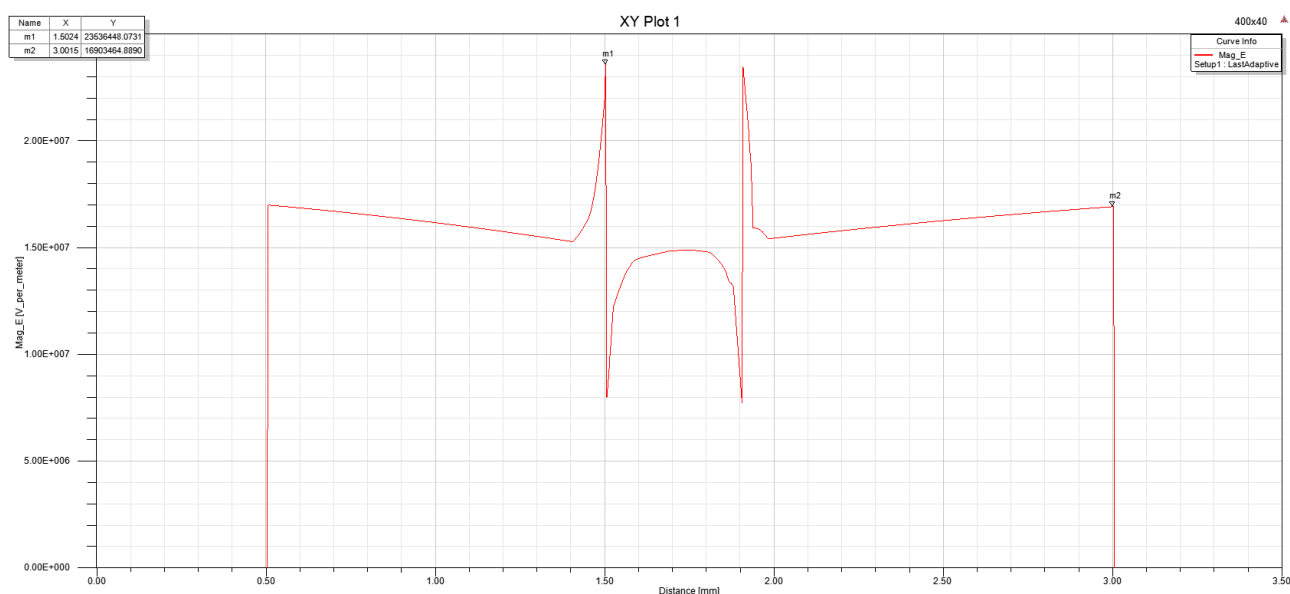


Рис. 3. Изменения напряженности поля при наличии влажного волокна 400 мкм, полученные в системе ANSYS Maxwell

Таблица 2. Значения напряженности поля при наличии волокон

Длина волокна, мкм	Состояние волокна	E_{cp} , кВ/мм	E_{max} , кВ/мм	E_{min} , кВ/мм
400	Влажное	30,24	49,5	21,14
	Сухое	19,65	23,47	16,91
200	Влажное	25,54	43,22	19,16
	Сухое	18,59	23,43	16,63
100	Влажное	19,61	26,24	15,88
	Сухое	16,96	19,82	15,41

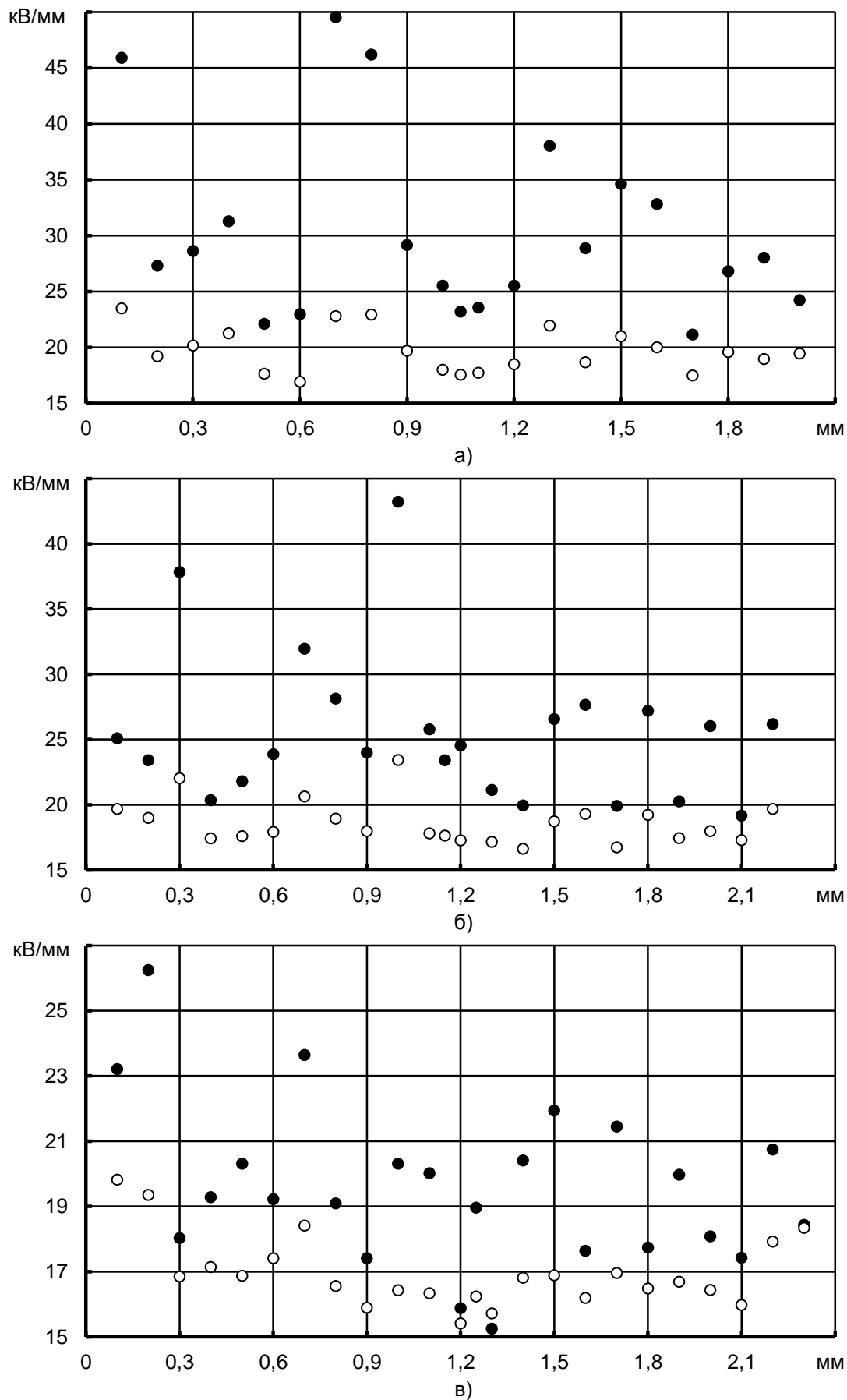


Рис. 4. Изменение максимального значения напряженности поля около волокна при различном его местоположении в промежутке относительно электрода 40 кВ: • – влажное волокно; ○ – сухое волокно; а – волокно длиной 400 мкм; б – 200 мкм; в – 100 мкм

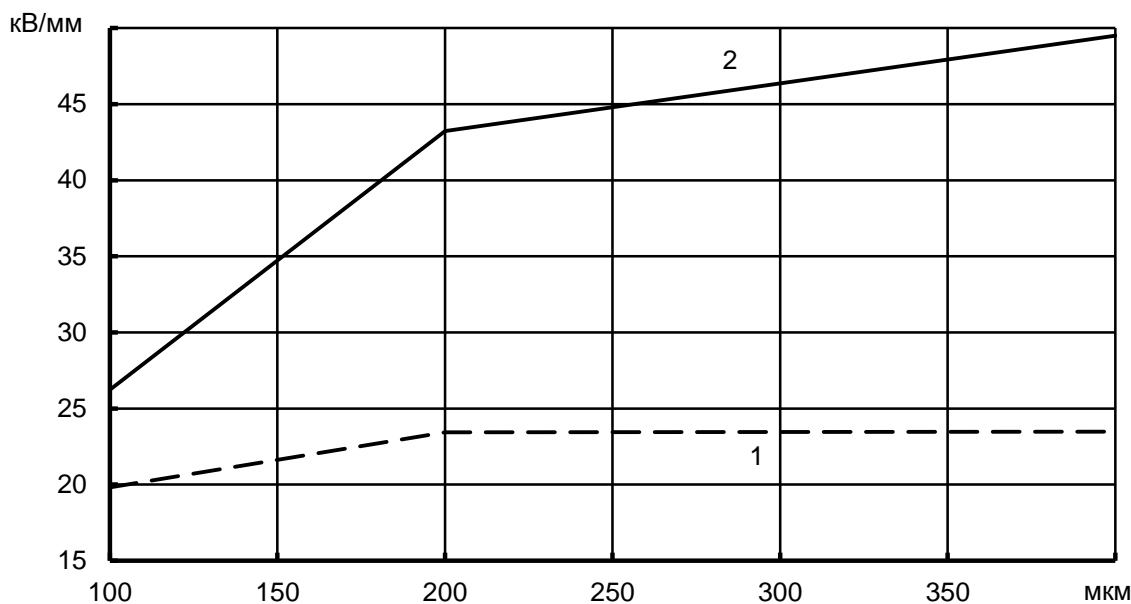


Рис. 5. Зависимость максимальной напряженности от длины волокон: 1 – сухое волокно; 2 – влажное волокно

Увлажнение волокон в 6 раз (с 1 до 6 %) приводит к увеличению напряженности электрического поля у их концов. Так, у волокон длиной 100 мкм максимальное увеличение напряженности достигает 32,4 %, 200 мкм – 84,46 %, 400 мкм – 111 %.

Так как электрическая прочность чистого трансформаторного масла находится в области 32 кВ/мм, то можно отметить, что максимальные значения напряженности, превышающие это значение, соответствуют волокнам длиной более 200 мкм. Значения максимальных напряженностей электрического поля при расположении мостика, состоящего из сухих или увлажненных волокон, между электродами системы представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов (табл. 3, рис. 6) показывает, что увеличение максимальных значений напряженности между сухими волокнами в мостике над средней напряженностью (16 кВ/мм) чистого масляного промежутка составляет 27,12 % для волокон длиной 100 мкм, 35,94 % – 200 мкм, 55,37 % – 400 мкм и 61,6 % – 500 мкм. Таким образом, сухие волокна длиной более 200 мкм слабо

влияют на искажение напряженности электрического поля.

Увеличение максимальных значений напряженности над средней между влажными волокнами составляет 64,62 % для волокон длиной 100 мкм, 114,06 % – 200 мкм, 230,12 % – 400 мкм и 256,1 % – 500 мкм.

Из расчетных данных видно, что скорость роста напряженности электрического поля между волокнами мостиков снижается для волокон длиной более 400 мкм.

Увлажнение волокон с 1 до 6 % дает увеличение напряженности электрического поля между волокнами в мостике из частиц длиной 100 мкм на 29,5 %, 200 мкм – 57,47 %, 400 мкм – 112,47 % и 500 мкм – 120,34 %.

Необходимо отметить, что напряженность поля в мостиках из сухих волокон (от 100 до 500 мкм) не превышает электрической прочности чистого трансформаторного масла в 32 кВ/мм. Для мостиков из влажных волокон напряженность поля начинает превышать электрическую прочность чистого масла при длине волокон более 200 мкм.

Таблица 3. Значения максимальной напряженности между волокнами мостика

Длина волокон мостика, мкм	500		400		200		100	
	Сухое	Влажное	Сухое	Влажное	Сухое	Влажное	Сухое	Влажное
E_{max} , кВ/мм	25,86	56,98	24,86	52,82	21,75	34,25	20,34	26,34

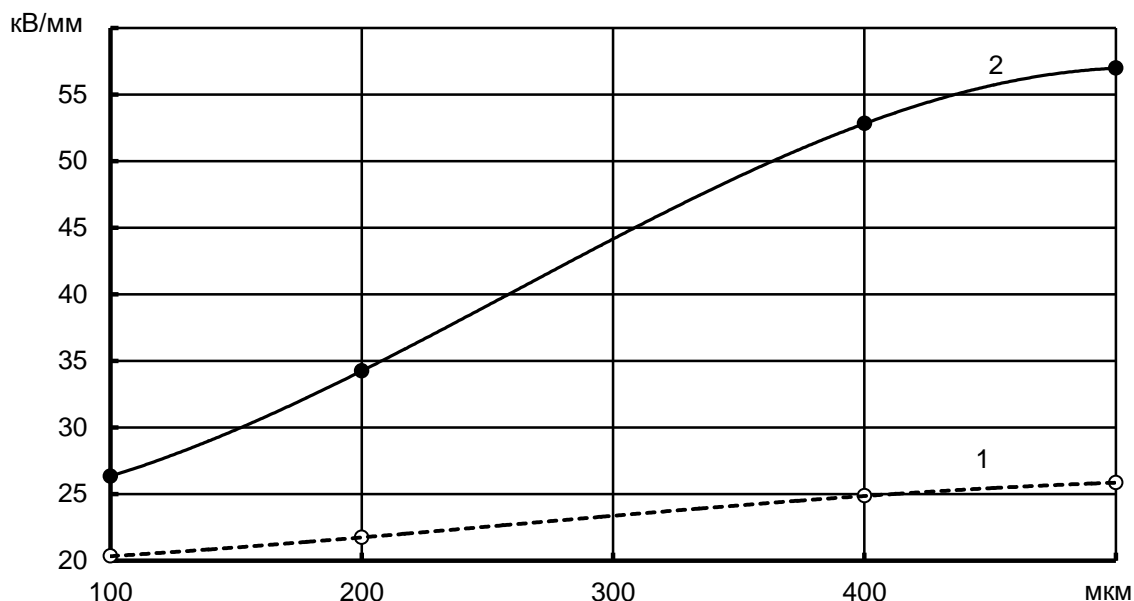


Рис. 6. Изменение максимальной напряженности между волокнами мостика от длины волокон: 1 — сухие волокна; 2 — влажные волокна

Увеличение напряженности поля между волокнами, особенно во влажном состоянии, выше электрической прочности чистого трансформаторного масла приводит к усилению ионизационных процессов в прослойках масла и снижению электрической прочности всего масляного промежутка.

Таким образом, наибольшее влияние на снижение электрической прочности масляных промежутков оказывают увлажненные волокна длиной более 200 мкм.

Распределение частиц по размерам в единице объема трансформаторного масла соответствует классам чистоты жидкости в соответствии с ГОСТ 17216-2001 [14]. По методике ГОСТ 6581-75 в испытательную ячейку заливают объем масла 0,4 л причем объем масла между электродами на два порядка меньше объема стандартной ячейки. Это следует учитывать при анализе эффективности испытаний масла на определение электрической прочности в стандартном разряднике.

В связи с этим далее определены изменения распределения частиц по размерам в объеме масла испытательной ячейки и в объеме масла между электродами стандартного разрядника.

Для этого проведен расчет числа частиц заданного размера в исследуемых объемах масла при испытании его в стандартном разряднике применительно к эксплуатационному маслу. Число частиц в объеме масла определялось по выражению

$$N = n_0 \cdot V_M, \quad (3)$$

где n_0 — число частиц заданного размера в единице объема (счетная концентрация); V_M — исследуемый объем масла.

Результаты расчета представлены в табл. 4. Анализ полученных данных показывает, что в объеме масла, находящемся в зазоре между электродами испытательной ячейки, нет частиц в виде волокон (400 мкм), хотя в самой ячейке находится достаточное количество волокон, соответственно, для классов чистоты эксплуатационного масла 9, 10, 11, 12 и 13.

Таким образом, применение существующей методики определения пробивного напряжения в стандартном разряднике приводит к тому, что влияние волокон (особенно увлажненных) на пробивное напряжение масла отражается не в полной мере. С другой стороны, как отмечалось выше, содержание волокон в объеме испытательной ячейки достаточно велико, поэтому необходимо при проведении испытаний создать условия для учета их влияния на формирование пробоя между электродами.

Выводы. Результаты моделирования показывают, что волокна целлюлозы приводят к сильному искажению электрического поля в межэлектродном промежутке и значительному увеличению напряженности поля в масляных прослойках между волокнами. Наиболее сильное влияние оказывают увлажненные волокна длиной более 200 мкм.

Таблица 4. Содержание механических частиц примесей в заданном объеме трансформаторного масла, шт.

Класс чистоты масла по ГОСТ 17216-2001	Объем масла	св. 100 до 200 мкм	Волокна (400 мкм)
13	1 м ³	2·10 ⁶	4·10 ⁵
	4·10 ⁻⁴ м ³	800	160
	2·10 ⁻⁶ м ³	4	нет
12	1 м ³	10 ⁶	2·10 ⁵
	4·10 ⁻⁴ м ³	400	80
	2·10 ⁻⁶ м ³	2	нет
11	1 м ³	5·10 ⁵	1·10 ⁵
	4·10 ⁻⁴ м ³	200	40
	2·10 ⁻⁶ м ³	1	нет
10	1 м ³	25·10 ⁴	5·10 ⁴
	4·10 ⁻⁴ м ³	100	20
	2·10 ⁻⁶ м ³	нет	нет
9	1 м ³	12·10 ⁴	4·10 ⁴
	4·10 ⁻⁴ м ³	48	16
	2·10 ⁻⁶ м ³	нет	нет

Результаты расчета распределения частиц показывают, что при проведении испытаний трансформаторного масла на пробой в стандартной ячейке слабо учитывается влияние длинных волокон (более 200 мкм) из-за малого объема масла между электродами. Это приводит к искажению результатов определения электрической прочности масла в действующем оборудовании.

Полученные результаты могут стать еще одним шагом на пути улучшения оценки качества трансформаторного масла, используемого в силовых трансформаторах в качестве изоляции.

Также полученные результаты могут быть использованы при исследованиях механизмов электрофизических процессов, происходящих в жидких диэлектриках при наличии волокон, так как такие исследования не проводились с середины прошлого века.

Список литературы

1. Лоханин А.К., Соколов В.В. Обеспечение работоспособности маслонеполненного оборудования после расчетного срока службы // Электро. – 2002. – № 1. – С. 10–16.
2. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
3. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов / А.П. Долин,

В.К. Крайнов, В.В. Смекалов, В.Н. Шамко // Энергетик. – 2001. – № 7. – С. 30–34.

4. Техника высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров и др.; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург, 2003. – 608 с.

5. Мельникова О.С. Выбор и расчет статистических характеристик электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов для повышения эффективности ее диагностики // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 3. – С. 38–44.

6. Методологические аспекты развития частичных разрядов и контроля изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации / М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов, В.Б. Комаров и др. // Энергетик. – 2017. – № 9. – С. 16–20.

7. Сканин Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.

8. Черноготский В.М., Джунь Л.П. Методология выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока / Электро. – 2009. – № 4. – С. 19–25.

9. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Инженерный метод расчета электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения // Электричество. – 2005. – № 3. – С. 82–85.

10. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 488 с.

References

1. Lokhanin, A.K., Sokolov, V.V. Obespechenie rabotosposobnosti maslonapolnennogo oborudovaniya posle raschetnogo sroka

sluzhby [Ensuring the operability of oil-filled equipment after the estimated service life]. *Elektro*, 2002, no. 1, pp. 10–16.

2. Vanin, B.V., L'vov, Yu.N., L'vov, M.Yu. O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniem 110–500 kV v ekspluatatsii [Damage of power transformers with voltage 110–500 kV during exploitation]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 9, pp. 53–58.

3. Dolin, A.P., Kraynov, V.K., Smekalov, V.V., Shamko, V.N. Povrezhdaemost', otsenka sostoyaniya i remont silovykh transformatorov [Damage, condition assessment and repair of power transformers]. *Energetik*, 2001, no. 7, pp. 30–34.

4. Bogatenkov, I.M., Bocharov, Y.N., Gumerova, N.I. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [Technique of high voltages]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. 608 p.

5. Mel'nikova, O.S. Vybor i raschet statisticheskikh kharakteristik elektricheskoy prochnosti maslyanykh kanalov glavnoy izolyatsii transformatorov dlya povysheniya effektivnosti ee diagnostiki [The selection and calculation of the statistical characteristics of the electric strength of the oil channels of the main insulation of transformers to increase the efficiency of its diagnosis]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 3, pp. 38–44.

6. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Komarov, V.B., Kulyukhin, S.A., Mit'kin, Yu.A., Vdoviko, V.P. Metodologicheskie aspekty razvitiya chastichnykh razryadov i kontrolya izolyatsii silovykh transformatorov v ekspluatatsii [Methodological aspects of the development of partial discharges and insulation control of power transformers during operation]. *Energetik*, 2017, no. 9, pp. 16–20.

7. Skanavi, G.I. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh poley)* [Physics of dielectrics (strong fields)]. Moscow: GIFML, 1958. 907 p.

8. Chornogotskiy, V.M., Dzhun', L.P. Metodologiya vybora izolyatsii transformatornogo oborudovaniya UVN peremennogo toka [Methodology for the selection of insulation of transformer equipment UVN AC]. *Elektro*, 2009, no. 4, pp. 19–25.

9. Lokhanin, A.K., Larin, V.S., Matveev, D.A. Inzhenernyy metod rascheta elektricheskoy prochnosti glavnoy izolyatsii silovykh transformatorov vysokogo napryazheniya [Engineering method for calculating the electrical strength of the main insulation of high voltage power transformers]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 3, pp. 82–85.

10. Govorkov, V.A. *Elektricheskie i magnitnye polya* [Electric and magnetic fields]. Moscow: Energiya, 1968. 488 p.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.015.24

Анатолий Анатольевич Анисимов

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

Сергей Вячеславович Тарарыкин

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

Георгий Николаевич Рощин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент магистратуры кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-53, e-mail: dartgeorge@mail.ru

Разработка и практическая реализация методов автоматической настройки цифровых управляющих устройств мехатронных систем¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время в системах управления мехатронными объектами широко применяются регуляторы состояния, высокие потенциальные возможности которых могут быть реализованы только при наличии средств автоматической настройки. Актуальность настройки в данном случае обусловлена повышенным числом степеней свободы регуляторов состояния, а также параметрической неопределенностью большинства мехатронных объектов управления. Применение известных методов автоматической настройки подобных регуляторов в режиме реального времени осложняется большим количеством экспериментов, существенным влиянием начальных условий на результат, появлением локальных экстремумов целевой функции из-за нелинейности реальных объектов.

Материалы и методы. Использованы методы пространства состояния, модального управления, цифрового проектирования систем, алгоритмы численной оптимизации, имитационного моделирования в среде MatLab.

Результаты. Выполнены разработка, реализация и экспериментальные исследования методов автоматической настройки цифровых полиномиальных регуляторов, основанных на применении эталонной модели, полученной путем оптимизации системы по комплексному критерию качества, а также на использовании априорной информации о мехатронном объекте. Методика настройки включает вариацию оценок неизвестных параметров объекта в соответствии с принятым алгоритмом оптимизации и расчет значений параметров регулятора методом модального управления на каждой итерации.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части Государственного задания на 2020 г.

Выводы. Результаты проведения вычислительных и натурных экспериментов подтвердили работоспособность и эффективность предложенных методов автоматической настройки цифровых полиномиальных регуляторов мехатронных систем. Использование эталонной модели системы, а также априорной информации об объекте управления позволяет решать задачи настройки при минимальном количестве опытов в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: мехатронная система, регулятор состояния, полиномиальный регулятор, эталонная модель, параметрическая оптимизация, настройка цифровых управляющих устройств, компьютерное моделирование

Anatoly Anatolyevich Anisimov

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

Sergey Vyacheslavovich Tararykin

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

Georgiy Nikolaevich Roschin

Ivanovo State Power Engineering University, Master student, Department of Electronics and Microprocessor Systems, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-53, e-mail: dartgeorge@mail.ru

Development and practical implementation of automatic tuning methods for mechatronic system digital controllers

Abstract

Background. Currently, the great potential abilities of digital state controllers widely applied in mechatronic systems may be fully realized only with the presence of automatic tuning instruments. The importance of automatic tuning in this case is related to high number of variable parameters for state controllers as well as to parametric indeterminacy of the majority mechatronic controlled objects. The application of optimization methods for automatic tuning of such controllers in real time mode is complicated by a large number of experiments, a significant influence of initial conditions on the result, and the local extremes of the fitness function due to the nonlinearity of real objects.

Materials and methods. Methods of state space, modal control, digital system design, numerical optimization algorithms and simulation in MatLab environment were used.

Results. The development, implementation and experimental research of automatic tuning methods for digital polynomial controllers are performed during the studying. The proposed approach based on application of reference model, obtained by optimizing the system according to a complex quality criterion, as well as using a priori information about a mechatronic object. The tuning method includes variation of the object unknown parameters in accordance with the accepted optimization algorithm and calculation of the controller parameters values by modal control method at each iteration.

Conclusions. As a result of computer simulation and field experiments, the efficiency of the proposed methods for automatic tuning of digital polynomial controllers of mechatronic systems was confirmed. Using the reference model of the system and a priori information about the control object allows us to solve tuning problems with a minimum number of experiments in real time.

Key words: mechatronic system, state controller, polynomial controller, reference model, parametric optimization, tuning digital controllers, computer simulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.034-043

Введение. Высокие потенциальные возможности систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами состояния [1–6] могут быть реализованы в полной мере только при наличии средств автоматической настройки, применяемых на этапах проектирования и ввода в эксплуатацию.

Актуальность настройки регуляторов состояния мехатронных систем обусловлена их параметрической неопределенностью, которая вызвана, в свою очередь, погрешностями идентификации, а также изменением режимов работы объекта – например, сменой обрабатываемой детали

на станке или конфигурации робота при перемещении [7–10].

Проведение настройки в ручном режиме в данном случае неэффективно, поскольку системы автоматического управления (САУ) на базе регуляторов состояния различных типов обладают большим количеством степеней свободы, то есть настраиваемых параметров, вариация которых неявным образом влияет на качество процессов управления.

В соответствии с предложенной ранее методикой [1, 8], разработка микропроцессорной системы автоматического управления мехатронным объектом включает в себя проектирование, конструирование и ввод в эксплуатацию. В процессе проектирования осуществляются идентификация мехатронного объекта, структурно-параметрический синтез робастного управляющего устройства, а также параметрическая оптимизация системы управления.

На первом этапе процедуры синтеза осуществляется выбор оптимальной структуры регулятора состояния на основе предложенных принципов робастного управления мехатронными объектами [1, 2, 7, 8]. Затем выполняется предварительный расчет параметров полученного регулятора состояния методом модального управления, позволяющим обеспечить основные показатели качества линеаризованной системы.

На втором этапе синтеза проводится дополнительная параметрическая оптимизация мехатронной системы на основе прямых показателей качества управления с использованием поисковых алгоритмов [1, 11–14]. Это позволяет решать задачу синтеза цифровой системы управления с учетом влияния возмущений, нелинейных факторов, вычислительного запаздывания и прочих особенностей реального объекта.

Автоматическая настройка управляющего устройства на реальном объекте управления, проводящаяся на этапе ввода системы в эксплуатацию, также может рассматриваться как задача параметрической оптимизации. Однако в данном случае оптимизация системы управления проводится в режиме реального времени, что предъявляет повышенные требования к быстродействию и сходимости применяемых алгоритмов.

Как показывает анализ результатов экспериментов, а также ряда опубликован-

ных ранее работ [1, 11–14], непосредственное применение методов параметрической оптимизации для решения задач автоматической настройки управляющих устройств мехатронных систем в режиме реального времени осложняется следующими обстоятельствами:

- относительно большим количеством опытов на реальном объекте управления в процессе настройки;

- существенным влиянием начальных условий на число опытов и результат процесса настройки;

- плохой обусловленностью целевой функции для применяемых критериев оптимальности;

- появлением локальных экстремумов целевой функции системы с регулятором состояния при воздействии помех на объект управления.

Генетические алгоритмы оптимизации позволяют обеспечить устойчивую сходимость процессов настройки САУ с регуляторами состояния независимо от начальных условий, в том числе при воздействии помех [15]. Однако параметрическая оптимизация в данном случае требует большого количества итераций (500–1500), что практически исключает применение подобных алгоритмов при настройке реальной мехатронной системы.

Ниже предлагается комплексный подход к задаче настройки мехатронных систем с регуляторами состояний, включающий параметрическую оптимизацию САУ и формирование эталонной модели, программную реализацию управляющего устройства и автоматическую настройку по эталонной модели с использованием априорной информации об объекте управления.

Структурно-параметрический синтез мехатронной системы управления. Анализ эффективности методов автоматической настройки будем проводить на примере двухмассовой мехатронной системы [1, 9, 10], структура которой приведена на рис. 1, где U – управляющее воздействие; M , M_E – моменты двигателя и упругой передачи; Ω_1 , Ω_2 – угловые скорости; J_1 , J_2 – моменты инерции; C_{12} и K_D – коэффициенты жесткости и трения; K_{PC} , T_{PC} – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя. Номинальные значения параметров рассматриваемого объекта управления приведены в табл. 1.

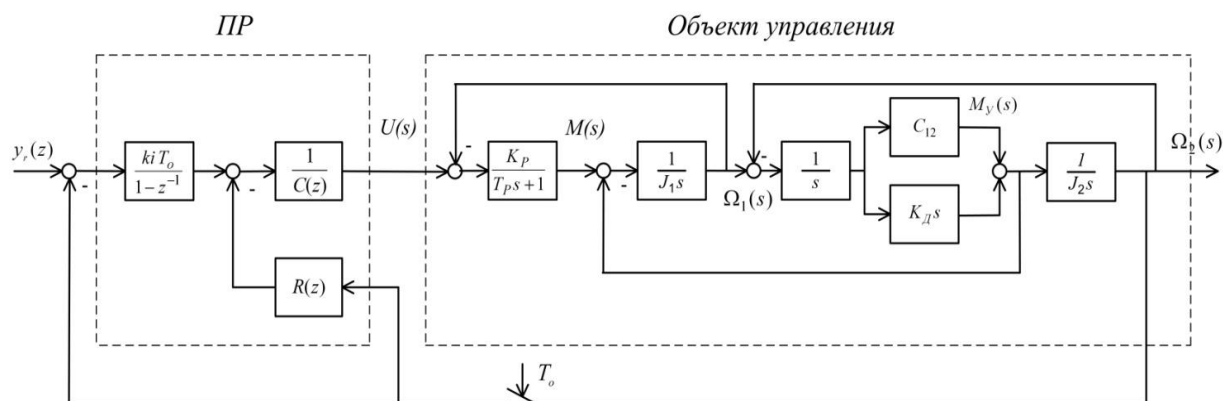


Рис. 1. Структура мехатронного объекта и системы управления с ПР

Таблица 1. Номинальные значения параметров мехатронной системы

K_{PC} , Н·м	T_{PC} , с	C_{12} , Н·м/рад	J_1 , кг·м ²	J_2 , кг·м ²	K_D , Н·м/рад
20	0,004	40	0,005	0,005	0,01

Пренебрегая малой постоянной времени силового преобразователя $T_p = 0,004$ с и коэффициентом трения K_D , для последующего синтеза робастной системы управления [2, 8] получим следующую передаточную функцию объекта:

$$H_o(s) = \frac{K_p \cdot C_{12}}{J_1 J_2 s^3 + K_p J_2 s^2 + (J_1 C_{12} + C_{12} J_2) s + K_p C_{12}} = \frac{b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (1)$$

где $A(s)$ и $B(s)$ – полиномы передаточной функции объекта с коэффициентами a_0 , a_1 , a_2 и b_0 .

Поскольку регулятор будет реализован в цифровой форме, целесообразно использовать при синтезе ПР структуру системы управления, изображенную на рис. 1. В целях обеспечения астатизма в структуру САУ введен дополнительный интегрирующий блок с коэффициентом k_i . В этом случае полиномы числителя $R(s)$ и знаменателя $C(s)$ передаточной функции аналогового прототипа ПР и желаемый характеристический полином замкнутой системы $D(s)$ будут иметь следующие степени:

$$\deg R(s) = \deg A(s) - 1 = 2;$$

$$\deg C(s) = \deg R(s) = 2;$$

$$\deg D(s) = \deg A(s) + \deg C(s) + 1 = 6.$$

Соответствующие этим степеням полиномы имеют вид:

$$R(s) = r_2 s^2 + r_1 s + r_0; \quad C(s) = s^2 + c_1 s + c_0;$$

$$D(s) = s^6 + d_5 s^5 + d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0.$$

Коэффициенты желаемого характеристического полинома системы $D(s)$ определяются путем оптимизации по комплексному критерию качества управления.

Параметрический синтез астатической системы управления с ПР в данном случае проводится путем решения алгебраического уравнения

$$s(A(s)C(s) + B(s)R(s)) + k_i B(s) = D(s). \quad (2)$$

Решение уравнения (2) позволяет определить параметры аналогового прототипа ПР, обеспечивающие заданное расположение полюсов замкнутой системы управления:

$$c_1 = d_5 - a_2; \quad c_0 = d_4 - a_1 - c_1 a_2;$$

$$r_2 = (d_3 - a_0 - a_1 c_1 - a_2 c_0) / b_0;$$

$$r_1 = (d_2 - a_0 c_1 - a_1 c_0) / b_0; \quad (3)$$

$$r_0 = (d_1 - a_0 c_0) / b_0;$$

$$k_i = d_0 / b_0.$$

В соответствии с методом цифрового перепроектирования было выполнено преобразование передаточной функции ПР в цифровую форму с использованием неявного метода Эйлера $s \rightarrow (1 - z^{-1}) / T_o$ [3, 6]. В результате такого преобразования были получены полиномы $R(z)$ и $C(z)$ регулятора со следующими коэффициентами:

$$R(z) = r_{2z} z^2 + r_{1z} z + r_{0z};$$

$$r_{2z} = (r_0 T_o^2 + r_1 T_o + r_2) / T_o^2;$$

$$r_{1z} = -(2r_2 + r_1 T_o) / T_o^2; \quad r_{0z} = r_2 / T_o^2; \quad (4)$$

$$C(z) = z^2 + c_{1z} z + c_{0z};$$

$$c_{2z} = (c_0 T_o^2 + c_1 T_o + 1) / T_o^2;$$

$$c_{1z} = -(2 + c_1 T_o) / T_o^2; \quad c_{0z} = 1 / T_o^2.$$

Для дальнейшей программной реализации полиномы ПР были преобразованы в разностные уравнения.

Параметрическая оптимизация и формирование эталонной модели мехатронной системы. В целях обеспечения компромисса между основными техническими требованиями к качеству управления и формирования эталонной модели для последующей настройки была проведена параметрическая оптимизация синтезированной системы с ПР [1, 11–14].

При этом в качестве критерия оптимальности использовался комплексный показатель качества управления, включающий в себя нормированные показатели быстродействия \bar{q}_1 , динамической точности \bar{q}_2 и параметрической грубости (робастности) \bar{q}_3 системы:

$$\bar{q}_m = 1 - \left(\prod_{i=1}^3 \bar{q}_i \right)^{1/3}. \quad (5)$$

В качестве показателя быстродействия q_1 принимается время нарастания переходной характеристики t_n , показателя точности q_2 – средний модуль относительного отклонения выходной координаты:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{100}{(N-T) \cdot |y_{ref}|} \sum_{j=T}^N |y_j - y_{ref}|, \quad (6)$$

где $T = t_n / T_o$ и $N = t_n / T_o$ – относительное время; t_n – время переходного процесса; T_o – период квантования.

Показателем робастности q_3 служит средний модуль отклонения переходной характеристики системы при вариации параметров объекта управления относительно расчетных значений:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{100}{N \cdot |y_{ref}|} \sum_{j=1}^N |y_j - y_j^*|, \quad (7)$$

где y_j , y_j^* – значения выходной координаты при расчетных и измененных параметрах объекта.

Нормирование показателей качества осуществляется с использованием функции Харрингтона:

$$\bar{q}_i = \exp(-\exp(-z_i)); \quad z_i = b_{0i} + b_{1i} q_i;$$

$$b_{0i} = z_i^{\text{good}} - b_{1i} q_i^{\text{good}}; \quad b_{1i} = \frac{z_i^{\text{good}} - z_i^{\text{bad}}}{q_i^{\text{good}} - q_i^{\text{bad}}},$$

где z_i – кодированное значение критерия; $z_i^{\text{хор}}$, $q_i^{\text{хор}}$ и $z_i^{\text{пл}}$, $q_i^{\text{пл}}$ – значения критериев,

соответствующие хорошему и плохому качеству системы.

Для нормирования показателей качества управления по шкале Харрингтона были определены уровни «хорошо» и «плохо» для каждого показателя (табл. 2).

Таблица 2. Уровни показателей качества управления

Показатель	i	q_i^{good}	q_i^{bad}
t_n , с	1	0,01	0,15
$\bar{\sigma}_y$, %	2	1,5	10
$\bar{\sigma}_R$, %	3	0,2	1,0

В результате оптимизации системы управления с ПР по сформированному комплексному критерию (5) с использованием генетического алгоритма *gatool*, реализованного в среде комплекса *MatLab*, были получены следующие параметры эталонной модели:

$$H_M(s) = \frac{k_f \cdot b_0}{s^6 + d_5 s^5 + d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0},$$

где d_0 , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 и d_5 – коэффициенты желаемого (оптимального) характеристического полинома САУ.

Разработка методов настройки управляющих устройств с использованием эталонной модели. В целях обеспечения устойчивой сходимости рекуррентных алгоритмов и сокращения длительности настройки управляющих устройств мехатронных систем предлагается использовать в качестве критерия оптимальности отклонение динамической характеристики реальной системы от эталонной модели (ЭМ) вида

$$H_M(s) = \frac{B(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^p + d_{p-1} s^{p-1} + \dots + d_1 s + d_0}. \quad (8)$$

Передаточная функция ЭМ состоит из полинома объекта управления $B(s)$ в числителе и оптимального в смысле комплексного критерия качества (5) характеристического полинома $D(s)$ в знаменателе. При реализации алгоритма настройки на базе микропроцессорного контроллера передаточная функция ЭМ (8) преобразуется в цифровую форму одним из известных способов [3, 6].

В процессе настройки следует минимизировать меру отклонения динамической

характеристики реальной системы от соответствующей характеристики ЭМ за время переходного процесса. В качестве такой меры может служить величина средне-квадратического отклонения

$$F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (y_j - y_j^M)^2}, \quad (9)$$

где N – относительное время переходного процесса; y_j , y_j^M – значения переходной характеристики системы и эталонной модели; j – номер отсчета.

Исследование эффективности оптимизационных алгоритмов настройки [12–14] проводилось с использованием модели двухмассовой мехатронной системы (рис. 1), для которой был синтезирован динамический ПР и путем оптимизации получена ЭМ в виде динамического звена (8).

Модель системы управления была реализована в среде Simulink комплекса MatLab, расчет среднего отклонения переходных характеристик системы от ЭМ выполнен в виде S-функции *contr_sim2* в соответствии с (9).

Поверхности отклика двухмассовой мехатронной системы с динамическим ПР при настройке по эталонной модели, полученные методом регулярного сканирования с шагом 2,5 % от исходных значений варьируемых параметров, приведены на рис. 2.

Поверхности имеют четко выраженный глобальный минимум, по мере удаления от него значение среднего по модулю отклонения F монотонно возрастает, что обеспечивает устойчивую сходимость поисковых алгоритмов настройки.

В табл. 3 приведены результаты оптимальной настройки мехатронной системы с динамическим ПР по эталонной модели градиентным методом ДФП и поисковым методом деформируемого симплекса (Нилдера-Мида). Типичные траектории движения к оптимуму изображены на рис. 2,а – для метода ДФП, на рис. 2,б – для метода Нилдера-Мида.

Как показывает анализ полученных данных, применение эталонной модели при настройке систем управления с цифровыми ПР обеспечивает устойчивую сходимость рекуррентных алгоритмов оптимизации независимо от начальных условий, а также снимает проблему локальных экстремумов.

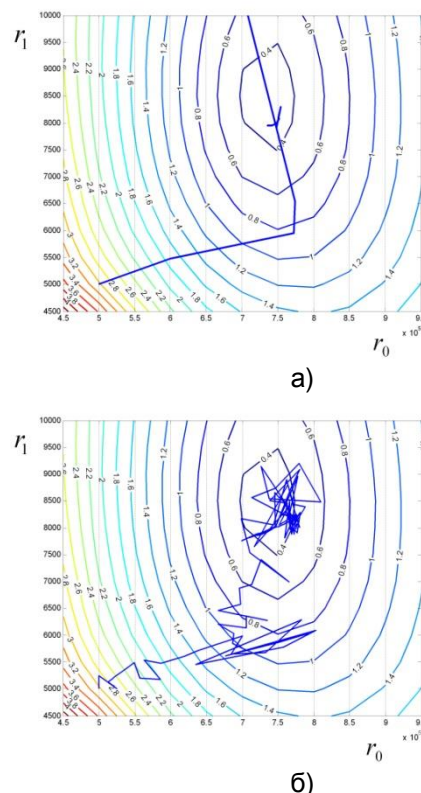


Рис. 2. Поверхности отклика системы с ПР и траектории движения к оптимуму при настройке по ЭМ: а – градиентным методом; б – симплексным методом

Таблица 3. Результаты настройки мехатронной системы с ПР по эталонной модели

Параметры ПР	Исходные параметры	Метод Нилдера-Мида	Метод ДФП
r_0	22879,00	7,1939e+05	7,3530e+05
r_1	28343	7,8818e+03	7,9606e+03
r_2	58,800	50,5680	52,2536
c_0	272125	6,0602e+04	4,2426e+04
c_1	800	800	800
N	–	113	86
F	0,6918	0,21	0,27

Вместе с тем настройка с использованием эталонной модели по-прежнему требует значительного количества опытов на объекте управления, что объясняется относительно большим количеством настраиваемых параметров регуляторов состояния.

Разработка методов настройки мехатронных систем с учетом априорной информации об объекте управления. В целях уменьшения длительности настройки систем с регуляторами состояния предлагается использовать априорную информацию, в качестве которой выступает

структура и известные разработчику параметры мехатронного объекта управления.

Это позволит варьировать в процессе настройки только оценки небольшого количества неизвестных параметров объекта управления (обычно 2–3), существенно снижая тем самым размерность задачи оптимизации.

Предлагаемый подход требует выполнения на каждой итерации алгоритма настройки процедуры параметрического синтеза управляющего устройства, т. е. цифрового регулятора состояния. В качестве критерия оптимальности настройки при этом целесообразно использовать введенную ранее эталонную модель, определяющую динамические свойства мехатронной системы управления.

Автоматизированный расчет параметров управляющего устройства в этом случае целесообразно проводить на основе метода модального синтеза, который относительно просто реализовать программно [1, 8]. В случае настройки системы с ПР вектор параметров регулятора определяется путем решения системы линейных уравнений, полученных на основе алгебраического уравнения синтеза (2).

В системах электропривода станков и поточных линий с упругими связями, описываемых двухмассовой математической моделью, параметры силового преобразователя и двигателя обычно известны достаточно точно, поскольку они весьма медленно меняются в процессе эксплуатации [9, 10]. Поэтому в процессе настройки целесообразно варьировать только оценки парамет-

ров механической части объекта управления – коэффициента упругости и момента инерции рабочего органа машины (C_{12} и J_2).

Структурная схема вычислительного устройства, реализующего предлагаемый метод настройки систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами состояния, приведена на рис. 3. В процессе настройки тестовый сигнал подается на вход системы управления с ПР и эталонной модели.

Блок расчета критерия обеспечивает вычисление значения F по формуле (9) на интервале времени переходного процесса. Блок настройки определяет новые значения варьируемых параметров системы C_{12} и J_2 , минимизирующих величину F , в соответствии с принятым алгоритмом оптимизации.

На основе этих оценок блок расчета осуществляет параметрический синтез регулятора на основе выражений (3) путем решения уравнения (2) для динамического ПР. Затем выполняется коррекция параметров ПР и повторение цикла настройки до тех пор, пока значение критерия F не окажется меньше заданного уровня.

В целях исследования эффективности предлагаемый алгоритм настройки управляющих устройств по эталонной модели был реализован в виде программы, написанной на языке комплекса MatLab. Программа включает в себя вычислительные процедуры, реализующие алгоритмы оптимизации – регулярное сканирование, градиентный метод ДФП и симплексный метод Нилдера-Мида [12–14].



Рис. 3. Структурная схема, иллюстрирующая принцип автоматической настройки системы с ПР по эталонной модели

Поверхности отклика синтезированной мехатронной системы с ПР и типичные траектории движения к оптимуму при настройке методом вариации оценок параметров объекта C_{12} , и J_2 с последующим расчетом параметров регулятора приведены на рис. 4.

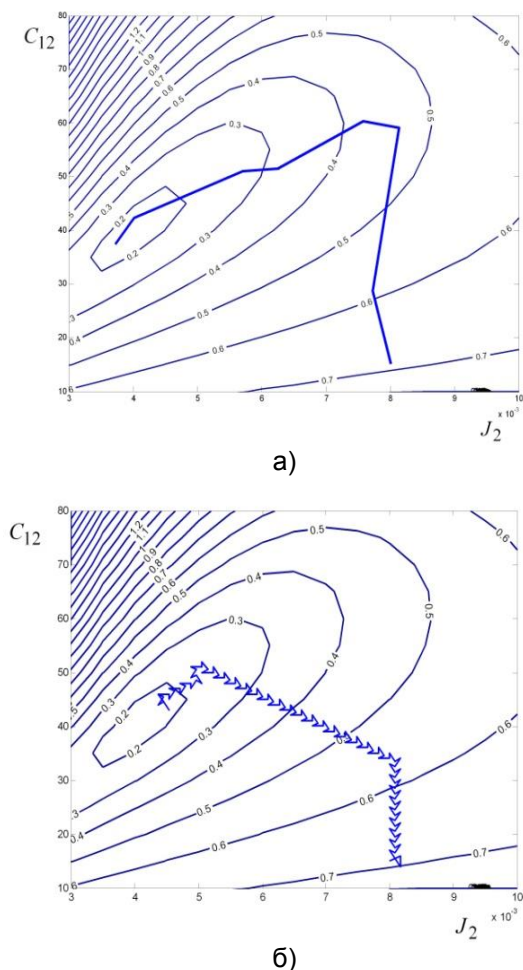


Рис. 4. Поверхности отклика системы с ПР и траектории движения к оптимуму при настройке с идентификацией объекта: а – градиентным методом; б – симплексным методом

Благодаря применению эталонной модели поверхности имеют четко выраженный глобальный минимум, по мере удаления от него значение среднего по модулю отклонения F монотонно возрастает.

В табл. 4 приведены результаты оптимальной настройки мехатронной системы предложенным методом, включающим вариацию оценок параметров объекта C_{12} , и J_2 , а также параметрический синтез ПР на каждой итерации, с использованием алгоритмов ДФП и Нилдера-Мида.

Полученные в результате настройки переходные характеристики двухмассовой мехатронной системы с цифровым ПР при-

ведены на рис. 5, где кривые 1 соответствуют исходным параметрам регулятора, кривые 2 – эталонной модели, кривые 3 – настройке оптимизационными методами.

Таблица 4. Результаты настройки мехатронной системы с ПР идентификационным методом

Параметры ПР	Исходные параметры	Метод Нилдера-Мида	Метод ДФП
J_2	0,0015	0,0044	0,0041
C_{12}	40	44	40,82
r_0	-5,7333e+04	2,5301e+05	2,2861e+05
r_1	500,6667	3,7468e+03	3,5539e+03
r_2	1,900	8,8440	8,4172
c_0	2,3733e+05	2,5332e+05	2,5372e+05
c_1	800	800	800
N	–	45	30
F	0,6918	0,1554	0,1554

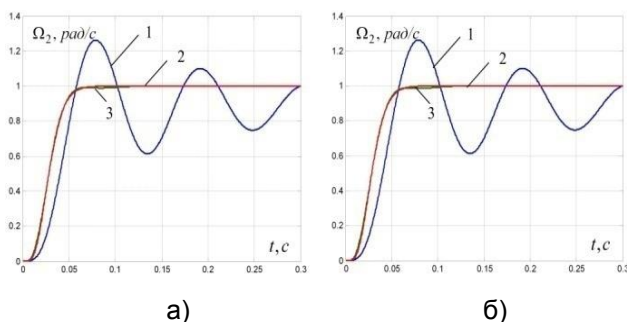


Рис. 5. Переходные характеристики мехатронной системы при настройке: а – градиентным методом; б – симплексным методом

Экспериментальные исследования методов настройки управляющих устройств мехатронных систем. Экспериментальные исследования предложенных методов автоматической настройки цифровых управляющих устройств мехатронных систем проводились на базе 4-канального лабораторного стенда, содержащего двигателя постоянного тока, широтно-импульсные преобразователи, фотоимпульсные датчики положения и скорости.

Для реализации цифровых управляющих устройств и алгоритмов настройки использовалась двухуровневая микропроцессорная система управления, состоящая из компьютера верхнего уровня и контроллера движения, программно совместимого с системой Turbo PMAC2 [15].

Разработанные цифровые регуляторы, а также алгоритмы их автоматической настройки были выполнены на базе контроллера движения с использованием язы-

ка высокого уровня и операционной системы реального времени. На компьютер верхнего уровня возложены функции отладки программных средств контроллера, а также отображения и архивирования результатов экспериментов.

Для проведения исследований на базе лабораторного стенда, оснащенного микропроцессорной системой управления, была реализована физическая модель мехатронного объекта с упругой связью между вращающимися массами, а также цифровое управляющее устройство ПР со структурой, приведенной на рис. 1.

Полученные экспериментальным путем переходные характеристики мехатронной системы управления с расчетными параметрами ПР и эталонной модели приведены на рис. 6. Синтезированная система управления в силу робастных свойств ПР устойчива, однако качество управления не соответствует заданному, что говорит о необходимости дальнейшей настройки.

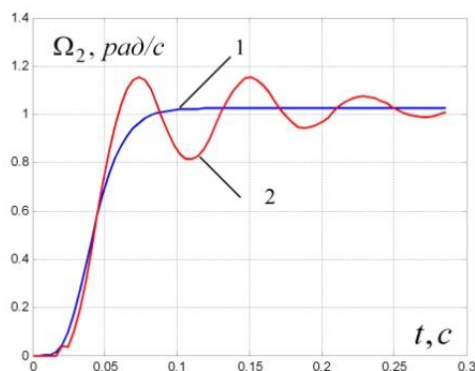


Рис. 6. Экспериментальные характеристики мехатронной системы при исходных параметрах цифрового ПР: 1 – эталонная модель; 2 – расчетные параметры ПР

Настройка мехатронной системы с цифровым ПР проводилась предложенным методом, основанным на применении эталонной модели, априорной информации об объекте управления и оперативном расчете параметров регулятора. Для решения задачи оптимизации на базе контроллера движения были реализованы поисковые методы правильного и деформируемого симплекса, а также градиентный метод ДФП.

Результаты автоматической настройки системы управления мехатронным объектом с ПР градиентным методом ДФП и симплексным методом Нилдера-Мида приведены на рис. 7, а, б соответственно.

Как показали экспериментальные исследования, разработанные алгоритмы настройки обеспечивают улучшение качества переходных процессов в системе управления, приближающегося в результате к эталонной модели.

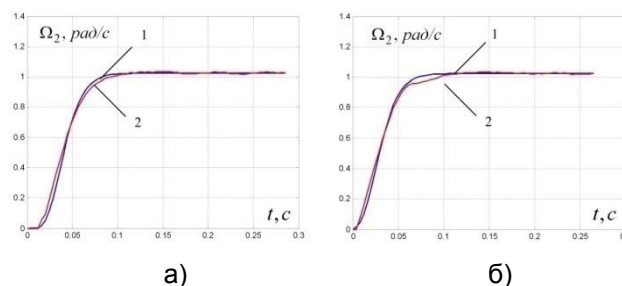


Рис. 7. Экспериментальные характеристики мехатронной системы при настройке: а – градиентным методом; б – симплексным методом

При этом симплексные алгоритмы обеспечивают настройку системы за 30–45 итераций, градиентные – за 25–30 итераций в зависимости от начальных условий.

Симплексные алгоритмы по сравнению с градиентными обеспечивают более качественную и надежную настройку, однако требуют большего количества опытов на реальном объекте управления.

Выводы. Таким образом, в результате проведения вычислительных и натурных экспериментов подтвердилась работоспособность и эффективность предложенных методов автоматической настройки цифровых полиномиальных регуляторов мехатронных систем управления.

Применение эталонной модели системы, полученной путем оптимизации мехатронной системы по комплексному критерию качества, а также использование априорной информации, включающей вариацию оценок неизвестных параметров объекта и расчет значений параметров регулятора на каждой итерации, позволяют эффективно решать задачу автоматической настройки при минимальном количестве опытов.

Минимальное количество опытов и устойчивая сходимость процессов настройки обеспечиваются при использовании рекуррентных алгоритмов численной оптимизации, причем наиболее эффективными и помехоустойчивыми оказываются поисковые методы деформируемого симплекса, а также градиентные методы с переменным шагом.

Список литературы

1. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами. – Иваново, 2015. – 296 с.

2. **Анализ** параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния / А.А. Анисимов, Д.Г. Котов, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 18–32.

3. **Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.

4. **Гайдук А.Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.

5. **Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э.** Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.

6. **Куо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.

7. **Поляк Б.Т., Щербаков П.С.** Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.

8. **Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.

9. **Шенфельд Р., Хабигер Э.** Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. / под ред. Ю.А. Борцова. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.

10. **William Bolton.** Mechatronics. Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. – Harlow, Edinburgh Gate: Pearson Education Limited, 2015. – Sixth edition. – 663 p.

11. **Hjalmarsson H.** Iterative feedback tuning – an overview // Int. J. Adaptive Control Signal Proc. – 2002. – Vol. 16(5). – P. 373–395.

12. **Singiresu S. Rao.** Engineering Optimization Theory and Practice. – New Jersey: John Wiley and sons, 2009. – Fourth edition. – 830 p.

13. **Roger Fletcher.** Practical methods of optimization. – New Jersey: John Wiley and sons, 2000. – Second edition. – 451 p.

14. **Edwin K.P. Chong, Stanislaw H. Zak.** An Introduction to Optimization. – New Jersey: John Wiley and sons, 2013. – Fourth edition. – 642 p.

15. **Turbo PMAC/PMAC2.** Software Reference Manual / Delta Tau Data Systems, Inc, December 19, 2012. – 757 p.

nastroyka sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami [Structural and Parametrical Synthesis, Optimization and Tuning of Control Systems for Industrial Plants]. Ivanovo, 2015. 296 p.

2. Anisimov, A.A., Kotov, D.G., Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. Analiz parametricheskoy chuvstvitel'nosti i strukturnaya optimizatsiya sistem modal'nogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya [Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 698–719.

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

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

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

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

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

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

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

10. Bolton, William. Mechatronics. Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. Harlow, Edinburgh Gate: Pearson Education Limited, 2015, sixth edition, 663 p.

11. Hjalmarsson, H. Iterative feedback tuning – an overview. Int. J. Adaptive Control Signal Proc., 2002, vol. 16(5), pp. 373–395.

12. Singiresu, S. Rao. Engineering Optimization Theory and Practice. New Jersey: John Wiley and sons, 2009, fourth edition, 830 p.

13. Fletcher, Roger. Practical methods of optimization. New Jersey: John Wiley and sons, 2000, second edition, 451 p.

14. Edwin, K.P. Chong, Stanislaw, H. Zak. An Introduction to Optimization. New Jersey: John Wiley and sons, 2013, fourth edition, 642 p.

15. Turbo PMAC/PMAC2. Software Reference Manual. Delta Tau Data Systems, Inc, December 19, 2012. 757 p.

References

1. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. *Strukturno-parametricheskiiy sintez, optimizatsiya i*

УДК 621.372.632

Александр Аркадьевич Николаев

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

Михаил Викторович Буланов

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

Карина Асламбековна Шахбиева

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: karina.shahbieva@yandex.ru

Разработка адаптивного алгоритма ШИМ активного выпрямителя и способа диагностики резонансных явлений во внутризаводских сетях

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время регулируемые электроприводы среднего напряжения чаще всего выполняются на основе преобразователей частоты с активными выпрямителями. В случаях, когда сеть среднего напряжения имеет протяженные кабельные линии, в сети могут возникать неблагоприятные резонансные явления, из-за чего при наложении значимых гармоник тока ПЧ с АВ на резонансную область возникают критические искажения напряжения в распределительной сети. Решением этой проблемы может быть установка специальных фильтров, корректирующих частотную характеристику сети. Однако это требует экспериментального определения частотной характеристики для всех возможных режимов электроснабжения, что на практике является сложной технической задачей. В связи с этим актуальным является исследование адаптивного способа снижения искажений напряжения, вызываемых работой ПЧ, в сетях с резонансными явлениями.

Материалы и методы. При разработке метода диагностики резонансных явлений и усовершенствованного алгоритма ШИМ проанализированы существующие алгоритмы ШИМ, применяемые фирмами-производителями электроприводов с АВ, и использованы известные способы математического моделирования ПЧ и систем электроснабжения. Главным допущением модели является представление инвертора источником тока.

Результаты. Разработан адаптивный способ снижения искажений в сетях с резонансными явлениями, представляющий собой усовершенствованный алгоритм ШИМ, позволяющий исключить из гармонического ряда кривой напряжения АВ группы гармоник, входящих в резонансную область. На имитационной модели системы ПЧ с АВ – сеть среднего напряжения проведен сравнительный анализ работы ПЧ с неадаптивным и адаптивным ШИМ. Установлено, что применение адаптивного алгоритма ШИМ существенно снижает искажения в сети при наличии резонансных явлений.

Выводы. Предложенный способ может быть применен для диагностики резонанса в разных частотных диапазонах в условиях меняющихся режимов электроснабжения. Адаптивный алгоритм может найти применение при проектировании ПЧ с АВ.

Ключевые слова: преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, резонанс токов, высшие гармоники

Alexander Arkadyevich Nikolaev

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

Mikhail Viktorovich Bulanov

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

Karina Aslambekovna Shakhbieva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, master student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: karina.shahbieva@yandex.ru

Development of adaptive PWM algorithm for an active rectifier and a method for diagnosing resonant phenomena in in-plant networks

Abstract

Background. Currently, adjustable medium voltage electric drives are mostly based on frequency converters with active rectifiers. In cases where the medium voltage network has extended cable lines, adverse resonance phenomena can occur in the network, due to which, when significant harmonics of the FC with AR are applied to the resonance region, critical voltage distortions occur in the distribution network. The solution to this problem can be the installation of special filters that correct the frequency response of the network. However, this requires experimental determination of the frequency response for all possible modes of power supply, which is a difficult technical task in practice. Therefore, it is relevant to study an adaptive method of reducing voltage distortions caused by the operation of a FC in networks with resonant phenomena.

Materials and methods. When developing a method for diagnosing resonance phenomena and an improved PWM algorithm, the existing PWM algorithms used by manufacturers of electric drives with AR has been analyzed and the well-known methods of mathematical modeling of frequency converters and power supply systems has been used. The main assumption of the model is representation of the inverter as a current source.

Results. An adaptive method for reducing distortion in networks with resonant phenomena based on improved PWM algorithm that allows excluding from the harmonic series of the voltage curve of the frequency converter the group of harmonics included in the resonance region has been developed. A comparative analysis of the FC with non-adaptive and adaptive PWM has been performed using simulation model of the FC system with AR – medium voltage network. It has been found that the use of the adaptive PWM algorithm significantly reduces the distortion in the network in the presence of resonance phenomena.

Conclusions. Method proposed can be applied to detect in-plant networks resonance in different frequency ranges when power supply mode is changing. Adaptive algorithm can be applied in the design of FC with AR.

Key words: frequency converter, active rectifier, pulse width modulation, electromagnetic compatibility, power quality, current resonance, higher harmonics

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.044-054

Введение. Электромагнитная совместимость (ЭМС) мощных электроприводов переменного тока среднего напряжения с преобразователями частоты (ПЧ), такими как главные привода современных прокатных станов в металлургическом производстве, является важной задачей, от решения которой зависит надежность электрооборудования и непрерывность технологического процесса.

ПЧ современных электроприводов прокатных станов имеют, как правило, в своем составе активный выпрямитель (АВ). Применение АВ позволяет улучшить гармонический состав токов (THD_i) за счет использования специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), поддерживать заданное значение напряжения в звене постоянного тока, а также рекуперировать энергию торможения в питающую сеть, повышая общую энергоэффективность технологического процесса.

Использование многопульсных схем выпрямления (12, 18, 24 – пульсации за период питающего напряжения), которые получают применением фазосдвигающих

трансформаторов, также способствует улучшению ЭМС благодаря изменению ряда генерируемых гармоник. Если в классической 6-пульсной схеме ряд гармоник описывается выражением $6n \pm 1$, где n – ряд натуральных чисел, то в 12-пульсной схеме ряд гармоник имеет вид $12n \pm 1$, в 18-пульсной – $18n \pm 1$, в 24-пульсной – $24n \pm 1$.

Для улучшения THD_i в электроприводах среднего напряжения с АВ большинство фирм производителей применяют многоуровневую топологию универсальных силовых модулей, которые используются и в выпрямителях и инверторах. Чаще всего применяется трехуровневая топология.

При проектировании мощных электроприводов с АВ также выбирают различные фильтры высших гармоник в зависимости от конфигурации питающей сети. Однако в процессе эксплуатации конфигурация распределительной сети может измениться, например при проведении оперативных переключений на электрической подстанции завода, при проведении модернизаций и реконструкций, а также при

подключении новых приемников электрической энергии.

В сетях среднего напряжения с протяженными кабельными линиями (несколько десятков километров) в результате взаимодействия эквивалентной емкости кабелей и индуктивности сетевого трансформатора могут возникать условия для возникновения резонансных явлений в области гармоник, генерируемых АВ. Чем больше суммарная длина кабельных линий, тем выше шанс появления резонанса в области значимых гармоник. Появление этих резонансов может привести к сильным искажениям напряжения в точке подключения ПЧ [3].

Традиционными способами обеспечения ЭМС в таких ситуациях являются организационные мероприятия, такие как выделение одной секции заводской подстанции для питания нелинейных потребителей электрической энергии (ПЧ), отключение неиспользуемых кабельных линий 6–35 кВ от шин распределительных устройств, грамотное проведение оперативных переключений на главной понизительной подстанции, исключающие одновременное включение ПЧ и протяженных кабельных линий.

Также для обеспечения ЭМС могут быть применены специальные фильтры, состоящие из конденсаторных батарей и малой индуктивности реактора, которые обеспечивают смещение резонансной области в низкочастотную область и уменьшение экстремума частотной характеристики сети [1, 3].

Альтернативным способом обеспечения ЭМС ПЧ с питающей сетью может являться использование адаптивных алгоритмов ШИМ АВ, исключающих из кривой тока, потребляемого АВ из сети, гармоники, расположенные в резонансной области частотной характеристики сети.

Для корректного функционирования адаптивных алгоритмов ШИМ необходимо разработать способ диагностики резонансных явлений во внутризаводских сетях 6–35 кВ, позволяющий осуществлять быстрое и точное определение расположения резонанса за счет тестовых воздействий АВ на питающую сеть.

Материалы и методы. Наиболее часто применяемая в ПЧ большой мощности трехуровневая топология АВ представлена на рис. 1. Каждая фаза активного выпрямителя выполнена с помощью последовательного соединения четырех высоковольтных

вентилей (на рис. 1 в качестве вентиляей изображены транзисторы), средняя точка которых подключается к вторичной обмотке согласующего трансформатора, крайние точки – к положительной и отрицательной шинам звена постоянного тока, при этом промежуточные точки с помощью двух дополнительных диодов присоединены к средней точке двух конденсаторов. Подобное решение позволяет использовать вентили класса $U_d/2$ за счет того, что к каждому вентилю прикладывается лишь половина номинального напряжения звена постоянного тока.

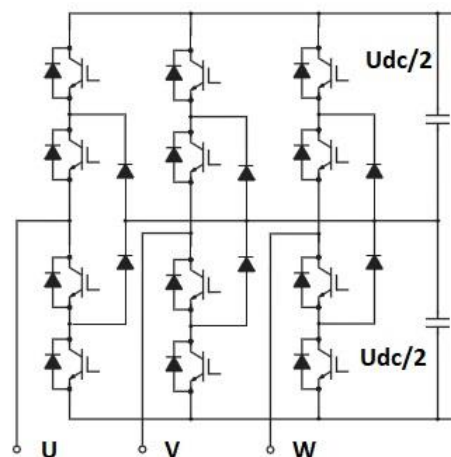


Рис. 1. Электрическая схема универсального силового модуля ПЧ с АВ

В таких ПЧ с АВ применяются специальные алгоритмы ШИМ, например ШИМ с фиксированными углами переключения вентилей FixedPulsePatternControl (FPPPWM) или ШИМ с удалением выделенных гармоник SelectiveHarmonicElimination (SHEPWM).

Особенностью FixedPulsePatternControl является минимизация суммарного коэффициента искажения кривой тока (THD), благодаря чему отсутствует необходимость во входном фильтре и возможно применение простой 6-пульсной схемы выпрямления. При этом присутствуют гармоники в напряжении АВ в областях 5–13 и 53–73 гармоник.

Особенностью алгоритма SelectiveHarmonicElimination является формирование таких углов переключения вентилей, при которых удаляются некоторые значимые гармоники в напряжении. Каждое дополнительное переключение вентилей АВ позволяет убрать из спектра одну гармонику. Например, при 6-пульсной схеме выпрямления и частоте коммутации 250 Гц

(пять переключений за четверть периода питающего напряжения) можно удалить 5, 7 и 11, 13 гармоники. Преобразователи, использующие данный алгоритм ШИМ, часто выполняются по многопульсной схеме выпрямления, с числом пульсаций 12, 18, 24 импульса за период питающего напряжения. В таких схемах гармонический состав потребляемых токов будет описываться выражением $P \cdot n(\pm 1)$, где P – число пульсаций за период питающего напряжения.

Способ диагностики резонансных явлений во внутривзаводских сетях 6–35 кВ за счет тестовых воздействий ПЧ с АВ. Для определения наличия резонансных явлений в распределительных сетях 6–36 кВ необходим анализ частотной характеристики сети. Частотная характеристика представляет собой зависимость полного комплексного сопротивления (импеданса) сети от частоты (номера гармоники). Указанную зависимость возможно получить двумя способами: расчетным путем, опираясь на параметры сетевого трансформатора, кабельных линий и т.д., а также экспериментальным путем. Во втором случае среди потребителей, подключенных к исследуемой сети, должен присутствовать активный элемент, генерирующий в сеть высшие гармоники тока, под действием которых с учетом нелинейного импеданса возникают высшие гармоники напряжения. Их соотношение позволяет экспериментально определить частотную характеристику сети $Z(f)$.

В нашем случае в качестве такого активного элемента выступает преобразователь частоты с АВ. С помощью АВ можно сделать тестовое воздействие на питающую сеть при отсутствии нагрузки на преобразователь (в режиме холостого хода). В результате воздействия несинусоидального тока АВ в напряжении сети должен появиться отклик соответствующего гармонического состава, благодаря чему возможно экспериментально восстановить частотную характеристику питающей сети путем нахождения отношений

$$Z_{(i)} = \frac{U_{m(i)}}{I_{m(i)}}, \quad (1)$$

где $Z_{(i)}$ – значение импеданса питающей сети на частоте i -й гармоники; $U_{m(i)}$, $I_{m(i)}$ – амплитуды напряжения и тока на частоте i -й гармоники.

Для повышения точности анализа частотной характеристики необходимо уменьшение безтоковых интервалов в ряде Фурье, что можно достичь за счет использования только одного 6-пульсного выпрямительного модуля. Однако такой источник высших гармоник содержит неполный спектр нечетных гармоник напряжения, описываемый по формуле $6 \cdot n(\pm 1)$, т.е. в нем отсутствуют гармоники, кратные трем. Кроме того, некоторые гармоники либо отсутствуют (например, при SelectiveHarmonicElimination), либо их амплитуда очень мала (некоторые гармоники при FixedPulsePatternControl), что затрудняет нахождение значений импеданса сети $Z_{(i)}$ на данных частотах (рис. 2, 3). По причине этого точность экспериментального определения частотной характеристики сети будет невысокой.

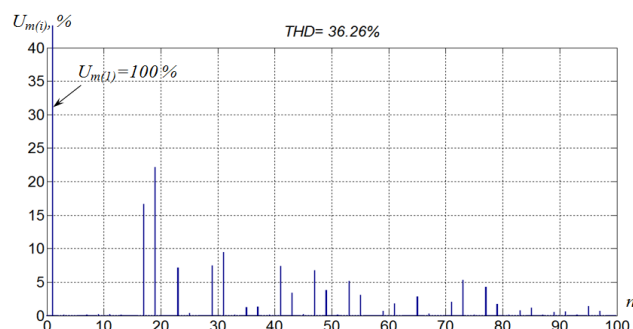


Рис. 2. Гармонический состав напряжения на входе АВ при использовании SelectiveHarmonic Elimination

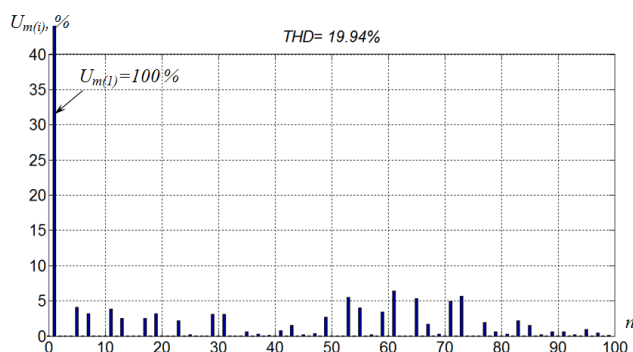


Рис. 3. Гармонический состав напряжения на входе АВ при использовании Fixed Pulse Pattern Control

Для более точного определения $Z(f)$ необходимо, чтобы гармонический состав напряжения АВ был более широким. Этого можно добиться изменением алгоритма коммутации вентиля. Если обеспечить перекося (несимметрию) фазных токов, например не подавая на вентили одной из фаз импульсы управления, либо коммутируя

вентили двух или одной фазы только на нулевую точку звена постоянного тока, можно получить в фазном токе высшие гармоники, кратные трем. Одновременно оптимальным решением будет уменьшить частоту коммутации АВ до 50 Гц (одно переключение за четверть периода) для обеспечения наибольшего THD_v (рис. 4).

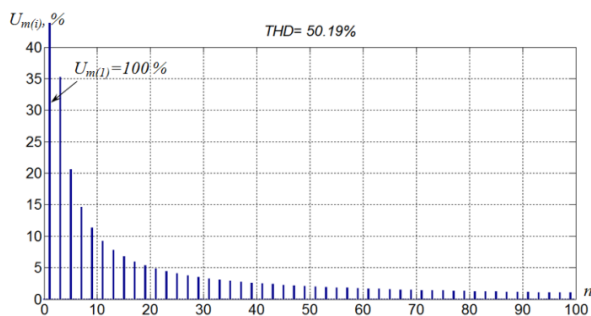


Рис. 4. Гармонический состав напряжения на входе АВ при частоте коммутации 50 Гц и перекосе фаз

В программном продукте MATLAB с приложение Simulink была создана имитационная модель системы сеть с резонансом – АВ. Было проведено моделирование тестового воздействия АВ на сеть с использованием стандартных алгоритмов ШИМ и модифицированного тестового алгоритма коммутации АВ для трех различных резонансов, с экстремумом на частотах гармоник с номерами $n = 20, 50$ и 80 (низкочастотная, среднечастотная и высокочастотная области) (рис. 5, а, б, в).

При использовании стандартных алгоритмов ШИМ был получен практически идентичный результат за исключением участков, где не наблюдается отклик в напряжении сети, усреднение которого представлено на рис. 6. При применении тестового алгоритма удалось снизить сум-

марное значение среднеквадратичной ошибки $\Delta z_{(i)}$ примерно в 1,5 раза (рис. 7):

$$\Delta z_{(f)} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N (z_{Act(i)} - z_{Mod(i)})^2}, \quad (2)$$

где N – общее число сравниваемых значений фактического $z_{Act(i)}$ и моделируемого $z_{Mod(i)}$ импедансов сети на различных участках, соответствующих i -му опыту.

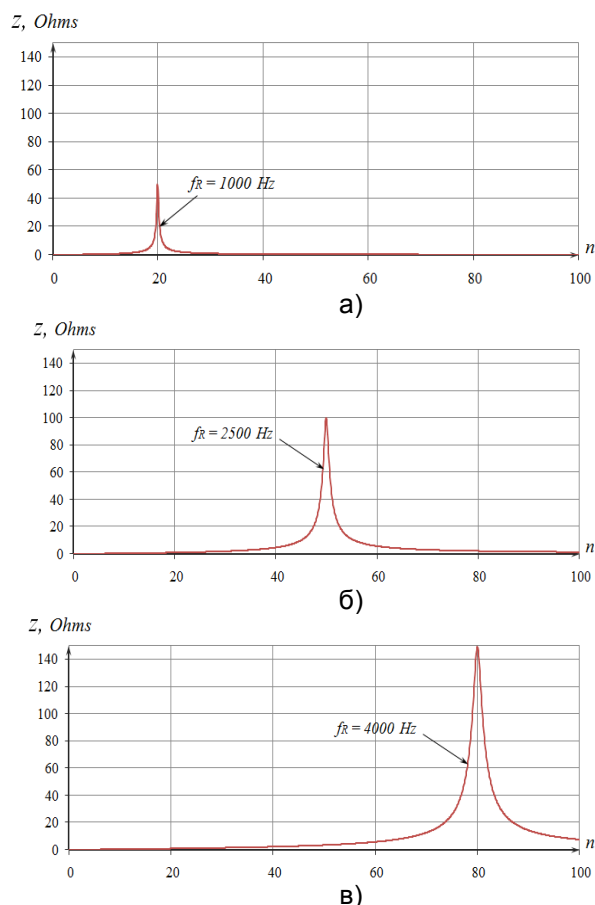


Рис. 5. Моделируемые резонансы в различных частотных диапазонах: а – низкочастотная область; б – среднечастотная область; в – высокочастотная область

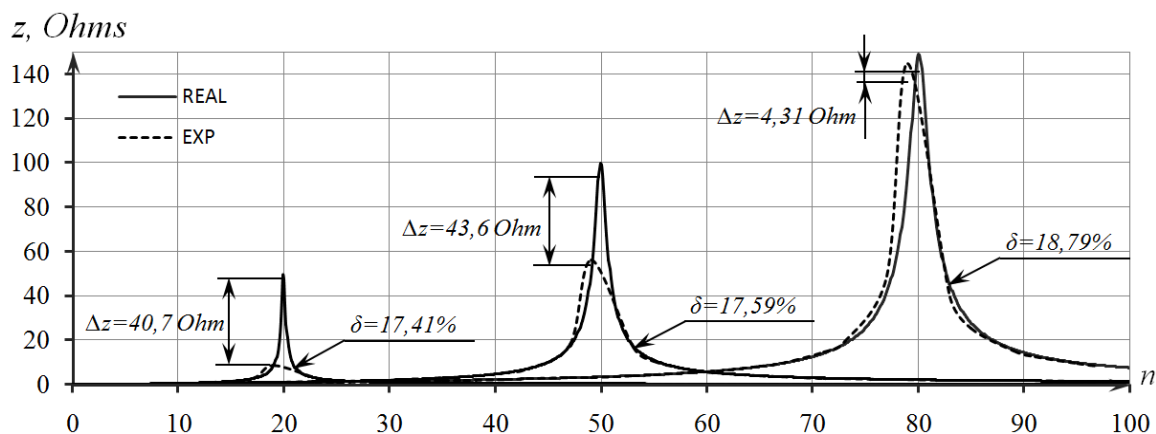


Рис. 6. Результат тестового воздействия стандартных алгоритмов ШИМ

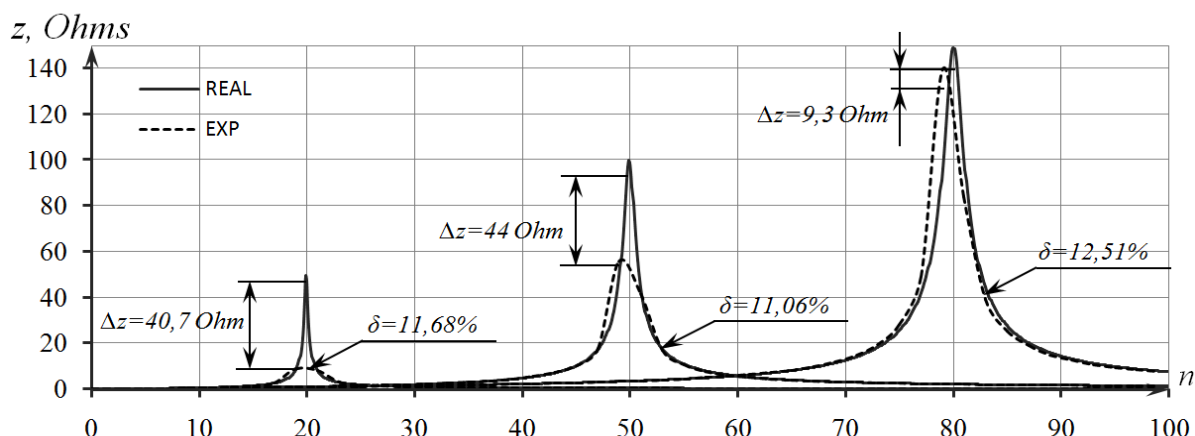


Рис. 7. Результат тестового воздействия при применении тестового алгоритма коммутации АВ

Суммарные значения среднеквадратичной ошибки сведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение ошибки при экспериментальном определении частотной характеристики

Алгоритм	Область резонанса			Среднее значение
	1000 Гц	2500 Гц	4000 Гц	
FixedPulse	17,41 %	17,59 %	18,79 %	17,93 %
Selective	17,41 %	17,59 %	18,79 %	17,93 %
Test algorithm	11,68 %	11,06 %	12,51 %	11,75 %

Анализ данных табл. 1 показывает, что использование тестового воздействия АВ со специальным алгоритмом ШИМ позволяет обеспечить приемлемую точность диагностики расположения резонанса в частотной характеристике питающей сети. Такой метод делает возможным корректное функционирование разработанного алгоритма ШИМ с функцией адаптации к резонансным явлениям в условиях изменяющихся режимов внутривзаводского электропитания.

Усовершенствованный алгоритм ШИМ уже был рассмотрен на основе FixedPulsePatternControl, ниже рассматривается усовершенствованный способ повышения качества напряжения в условиях наличия резонансных явлений на основе наиболее распространенного алгоритма ШИМ SelectiveHarmonicElimination (SHEPWM) [4].

Математические основы SHEPWM.

Помимо возможности удаления выделенных гармоник, SHEPWM позволяет обеспечивать уровень первой гармоники выходно-

го напряжения на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции:

$$U_m = (2/\pi) u_{dc} m, \quad (3)$$

где m – коэффициент модуляции; U_m – амплитуда первой гармоники фазного напряжения; u_{dc} – напряжение звена постоянного тока.

Разложение в ряд Фурье фазного напряжения AR выглядит следующим образом:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} (U_m \cdot \sin(n \cdot \omega t)), \quad (4)$$

где U_m определяется уравнением

$$U_m = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u(\omega t) \cdot \sin(n \cdot \omega t) d(\omega t) = \frac{4}{\pi n} \frac{u_{dc}}{2} \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot a_k), \quad (5)$$

где a_k – угол переключения при удалении гармоники с номером k из фазного напряжения.

Подставив (5) в (4), получим уравнение для фазного напряжения AR в следующем виде:

$$u = \sum_{n=1,3,\dots,\infty} \frac{2u_{dc}}{\pi n} \left[\sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n \cdot a_i) \right] \times \sin(\omega t \cdot n). \quad (6)$$

Анализ выражения (6) позволяет определить связь между углами переключений и спектральным составом выходного напряжения посредством системы нелинейных уравнений:

$$\sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(a_k) = \frac{\pi}{4} \frac{2}{u_{dc}} U_m; \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot a_k) = 0, \quad n = 5, 7, 11, \dots$$

Подставим в уравнение (7) коэффициент модуляции, выраженный через (3), при условии $m \in [0; 1]$, после чего получим:

$$\sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(a_k) = m; \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot a_k) = 0, \quad n = 5, 7, 11, \dots$$

Нелинейная система (8) имеет несколько решений в зависимости от начального приближения. Для отыскания всех возможных решений используется метод перебора начальных приближений. Среди полученных результатов выделяют варианты, удовлетворяющие условию

$$0 < a_1 < a_2 < \dots < a_N < \pi/2. \quad (9)$$

Результаты исследования работы алгоритма на основе SHEPWM с адаптацией к резонансным явлениям в сети. Алгоритм SHEPWM с адаптацией к резонансным явлениям в сети был реализован для классической 6-пульсной схемы выпрямления, поскольку эта схема имеет наиболее низкий ЕМС, по сравнению с многопульсными схемами.

Суть реализованного алгоритма заключается в выборе набора углов переключения в зависимости от расположения экстремума частотной характеристики питающей сети среднего напряжения и его амплитуды. Благодаря выбору оптимальных групп гармоник, подлежащих исключению из гармонического ряда кривой напряжения AR, удастся существенно уменьшить влияние FC на питающую сеть.

Для реализации адаптивного алгоритма ШИМ на основе SelectiveHarmonic Elimination были рассчитаны углы переключения для исключения целого ряда групп гармоник (табл. 2).

Для соответствующих гармоник были рассчитаны углы переключения в зависимости от коэффициента модуляции m .

В программном продукте MATLAB Simulink с библиотекой SimPowerSystems была собрана математическая модель преобразователя частоты среднего напряжения 3,15 кВ и сети среднего напряжения 10 кВ с резонансом токов (рис. 8).

Таблица 2. Группы исключаемых гармоник

№ группы	Номера гармоник			
1	5	7	11	13
2	11	13	17	19
3	17	19	23	25
4	23	25	29	31
5	29	31	35	37
6	35	37	41	43
7	41	43	47	49
8	47	49	53	55
9	53	55	59	61
10	59	61	65	67
11	65	67	71	73
12	71	73	77	79
13	77	79	83	85
14	83	85	89	91
15	89	91	95	97

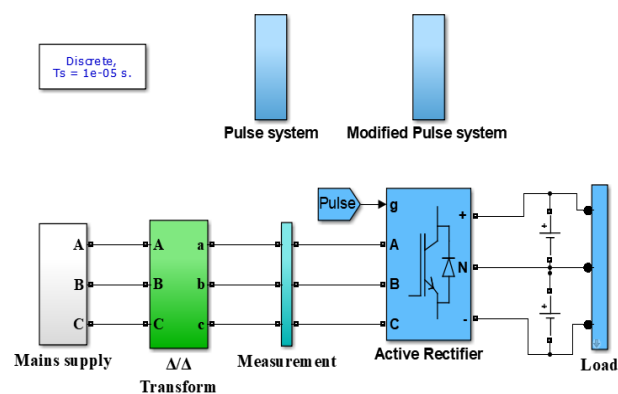


Рис. 8. Исследуемая иммитационная модель сеть – преобразователь частоты

В блоке **Mains supply** реализована питающая сеть с последовательными резонансами для трех частот: 1000, 2500, 4000 Гц (рис. 9).

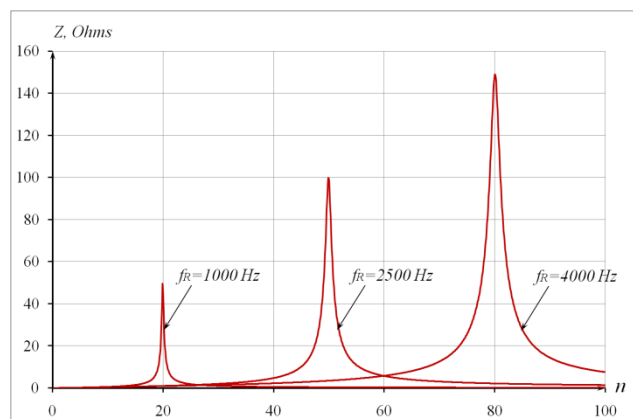


Рис. 9. Моделируемые резонансы в низкочастотной 1000 Гц, среднечастотной 2500 Гц и высокочастотной 4000 Гц областях

Блок **Δ/Δ Transform** реализует параметры схемы замещения согласующего трансформатора 10/3,15 кВ. Блок **Measurement** производит измерение электрических параметров, необходимых для работы **ActiveRectifier**. В блоках **Pulsesystem** и **ModifiedPulsesystem** реализованы алгоритмы переключения вентилей **ActiveRectifier**.

Блок **ModifiedPulsesystem** производит отслеживание расположения резонанса токов в питающей сети, анализируя ток и напряжение в сети 10 кВ, и при необходимости изменяет группу гармоник, подлежащую исключению. Таким образом, из области резонанса исключаются гармоники тока, потребляемые АВ.

С помощью математической модели был произведен анализ гармонических составляющих линейного напряжения сети 10 кВ и напряжения на входе АР при использовании SelectiveHarmonicElimination и SHEPWM с адаптацией к резонансным явлениям в сети для трех различных резонансов с экстремумом на частотах гармоник с номерами $n = 20, 50$ и 80 (рис. 10, 11, 12).

Анализ полученных результатов показывает, что при расположении резонанса в высокочастотной области использование усовершенствованного алгоритма ШИМ становится нецелесообразным, поэтому экспериментально был определен номер гармоники ($n = 67$), до которой использование адаптивного ШИМ имеет смысл (рис. 13).

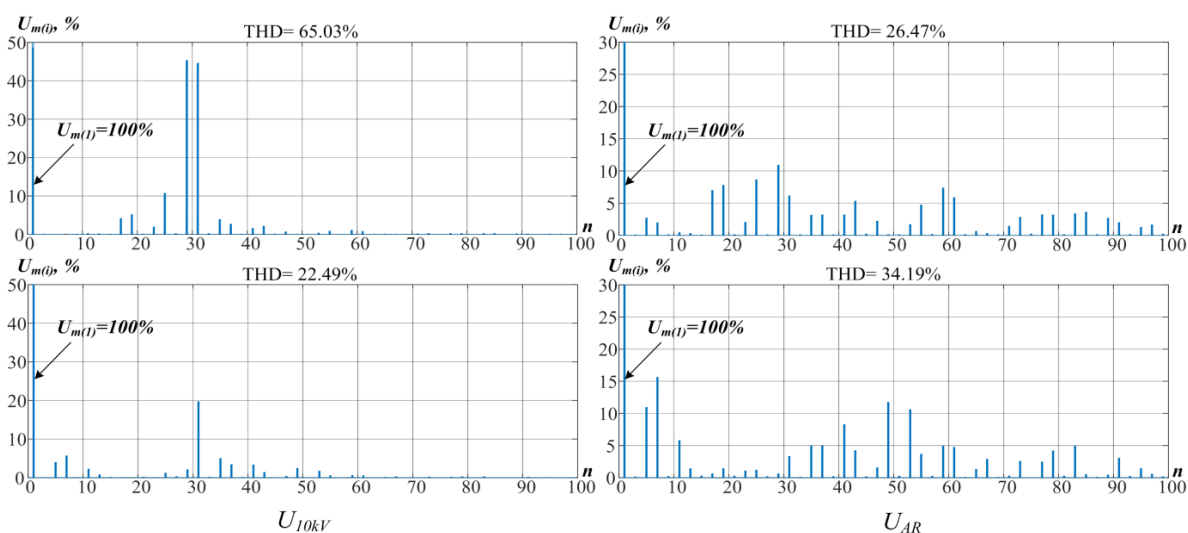


Рис. 10. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при наличии резонанса в низкочастотной области

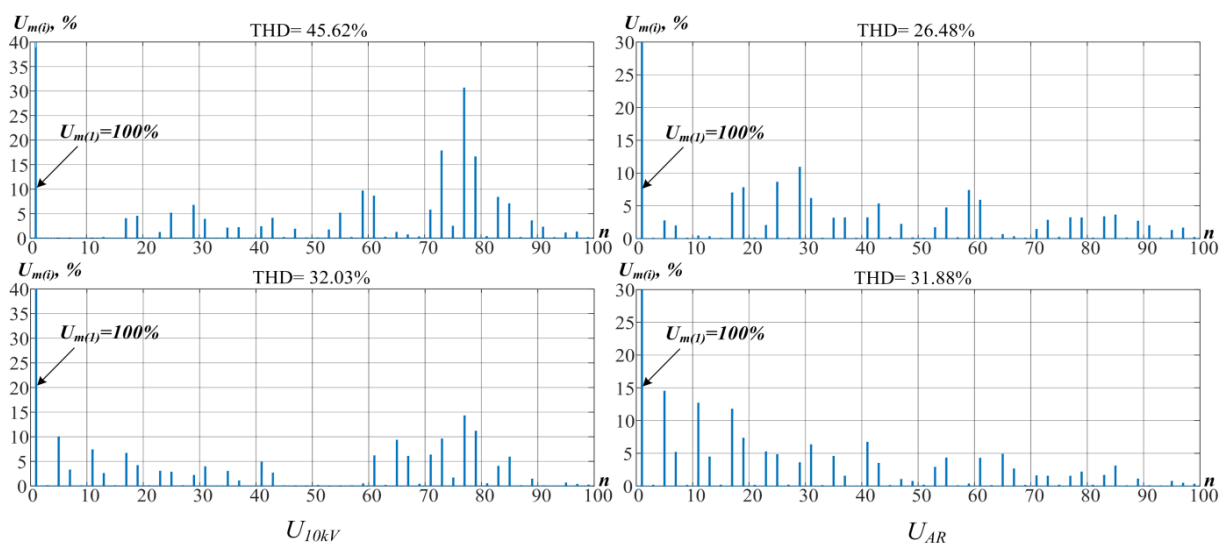


Рис. 11. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при наличии резонанса в среднечастотной области

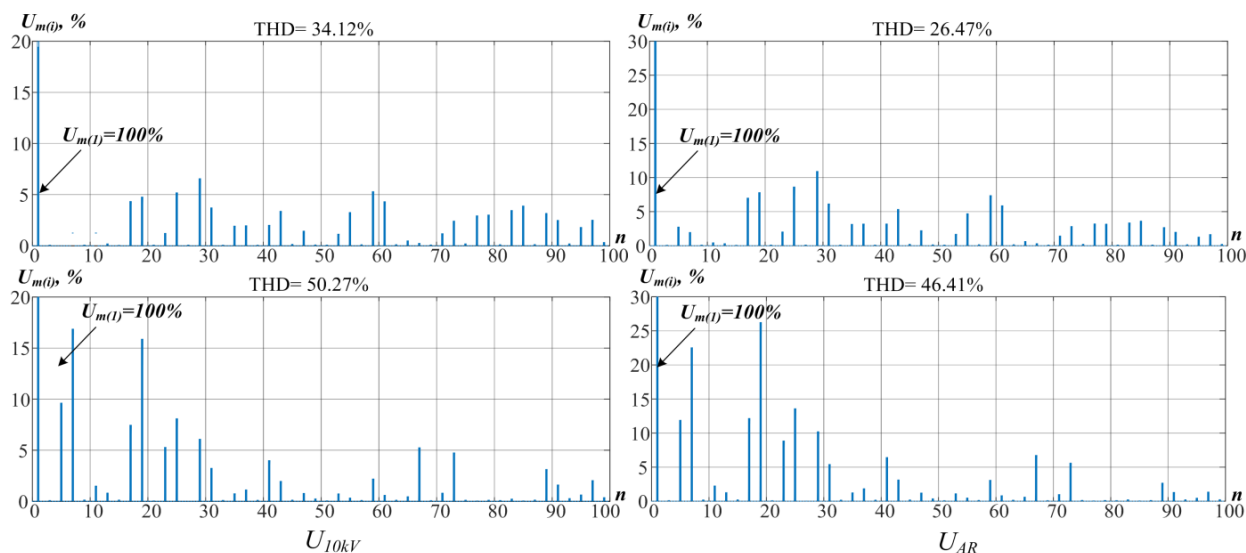


Рис. 12. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при наличии резонанса в высокочастотной области

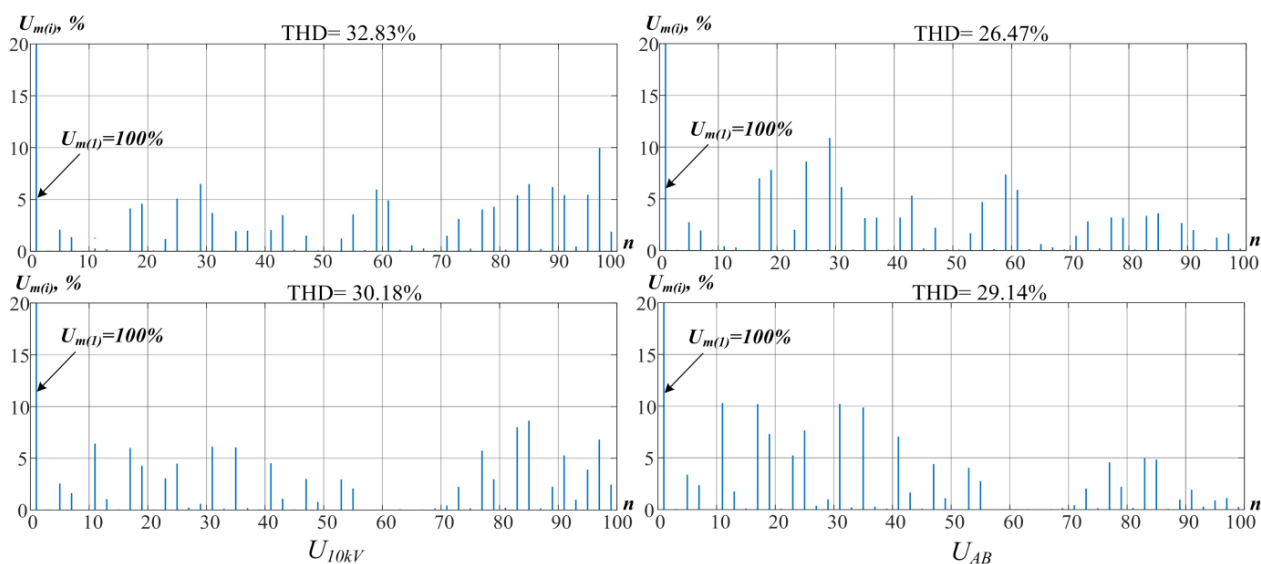


Рис. 13. Результат использования адаптивного алгоритма ШИМ при резонансе с экстремумом на 67 гармонике

Значения коэффициентов гармонических искажений линейного напряжения сети 10 кВ сведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение коэффициентов гармонических искажений при адаптивном алгоритме ШИМ по напряжению в сети 10 кВ

Алгоритм	Область резонанса		
	1000 Гц	2500 Гц	4000 Гц
SHEPWM	65,03 %	45,62 %	34,12 %
Адаптивный SHEPWM	22,49 %	32,03 %	50,27 %

Выводы. Наличие в системах электроснабжения металлургических предприятий протяженных распределительных сетей среднего напряжения с высоким зна-

чением эквивалентной емкости кабельных линий создает условия для появления резонансов токов в области генерирования гармоник мощными преобразователями частоты с активными выпрямителями. Данное обстоятельство является одним из факторов, отрицательно влияющих на электромагнитную совместимость преобразователей частоты с распределительной сетью.

Для обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ с АВ с питающей сетью в условиях наличия резонансных явлений применяются различные организационные и технические мероприятия, такие как грамотная организация режимов электроснабжения различных групп электроприемников с питанием от отдельных секций шин

и использование специализированных компенсирующих устройств.

Альтернативным способом исключения негативного влияния резонансных явлений на электромагнитную совместимость ПЧ с АВ с питающей сетью является применение адаптивных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей, исключающих генерирование высших гармоник в области резонанса.

Предложенный алгоритм ШИМ с адаптацией к резонансным явлениям в сети заключается в выборе специализированного набора углов переключения ключей АВ, что позволяет исключить из гармонического ряда кривой напряжения в точке подключения преобразователя оптимальные группы гармоник, входящих в опасный частотный диапазон. Применение данного алгоритма в распределительных сетях среднего напряжения с наличием резонансных явлений в низкочастотной и среднечастотной областях позволяет существенно улучшить гармонический состав напряжения сети и обеспечить электромагнитную совместимость мощных ПЧ с АВ с питающей сетью.

Для исключения ухудшения качества электроэнергии при расположении резонанса в высокочастотной области ($f_{min} \leq f \leq f_{max}$), помимо модифицированного алгоритма SHEPWM, должны применяться дополнительные технические мероприятия в виде установки фильтрокомпенсирующих устройств, осуществляющих коррекцию частотной характеристики сети $z(f)$.

Для корректного функционирования адаптивного алгоритма ШИМ ПЧ с АВ необходимо применять оперативную диагностику частотной характеристики питающей сети при любых изменениях режимов внутризаводского электроснабжения и режимов работы других электроприемников, включая компенсирующие устройства.

Предложенный способ оперативной диагностики частотной характеристики распределительной сети 6–35 кВ системы внутризаводского электроснабжения заключается в использовании специализированных алгоритмов переключения ключей АВ, обеспечивающих формирование широкого спектра гармоник в потребляемом токе выпрямительного модуля для последующего анализа изменения гармонического состава напряжения в точке подключения преобразователя. Применение данного

способа позволяет определять опасные частотные диапазоны с резонансами токов для выполнения необходимой настройки адаптивных алгоритмов ШИМ АВ в целях обеспечения наилучшего гармонического состава напряжения сети.

Список литературы

1. Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Афанасьев М.Ю. Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутризаводского электроснабжения промышленных предприятий // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 51–62.
2. Endrejat F., Pillay P. Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System // IEEE International Electric Machines & Drives Conference. – 2007. – P. 736–741.
3. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System / J. Pontt, G. Alzamora, R. Huerta, N. Becker // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2005. – P. 482–488.
4. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутризаводской сети / А.А. Николаев, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, А.С. Денисевич // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 47–56.
5. Alawasa K.M., Moamed R.I., Xu W. Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – P. 121–134.
6. Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 59–69.
7. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 96–103.
8. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станков // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 3–7.
9. Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П. Расчет электромагнитных процессов в трехфазном трехуровневом инверторе напряжения // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – Вып. 1. – С. 221.
10. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposi-

tion, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. – 2001. – P. 557–562.

11. **Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Бельный А.В.** Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 23–30.

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

13. **Celanovic N., Boroyevich D.** A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2001. – P. 637–641.

14. **Blooming T.M., Carnovale D.J.** Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits // *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*. – 2006. – P. 1–9.

References

1. Nikolaev, A.A., Khamshin, T.R., Afanas'ev, M.Yu. Issledovanie rezonansnykh yavleniy v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh srednego napryazheniya sistem vnutrizavodskogo elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Study of Resonant Phenomena in Medium Voltage Distribution Networks of Industrial Power Supply Systems]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 51–62.

2. Endrejat, F., Pillay, P. Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, Antalya, 2007, pp. 736–741.

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

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

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

6. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Bulanov, M.V. Issledovanie parallel'noy raboty avtoma-

tizirovannykh elektroprivodov prokatnogo stana i dugovoy staleplavil'noy pechi [Investigation of parallel work of rolling mill's automated electric drives and an electric arc furnace]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 59–69.

7. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khamshin, T.R., Nikiforov, G., Mutallapova, F.F. Eksperimental'nye issledovaniya elektromagnitnoy sovmestimosti sovremennykh elektroprivodov v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of industrial enterprises]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–103.

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

9. Khamshin, T.R., Khamshin, R.R., Kornilov, G.P. Raschet elektromagnitnykh protsessov v trekhfaznom trekhurovnevom invertore napryazheniya [Calculation of electromagnetic processes in a three-phase three-level voltage inverter]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2010, issue 1, p. 221.

10. O'Brien, K., Teichmann, R., Bernet, S. Active rectifier for medium voltage drive systems. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, 2001, pp. 557–562.

11. Maklakov, A.S., Gasiyarov, V.R., Belyy, A.V. Energoberegayushchiy elektroprivod na baze dvukhzvennogo preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypryamitelem i avtonomnym invertorom napryazheniya [Energy-saving electric drive on the basis of back to back converter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 23–30.

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

13. Celanovic, N., Boroyevich, D. A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Mar. 2001, vol. 37, no. 2, pp. 637–641.

14. Blooming, T.M., Carnovale, D.J. Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits. *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 2006, pp. 1–9.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.165

Алексей Евгеньевич Барочкин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Владимир Павлович Жуков

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

Мария Сергеевна Шумилова

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», магистрант, Россия, Иваново, e-mail: bobrova_m_s@mail.ru

Евгений Витальевич Барочкин

ФГБОУВО «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

Антон Николаевич Беляков

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

Оптимизация структуры и режима работы сложных теплообменных систем с многокомпонентными теплоносителями

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для проведения расчетных исследований при поиске эффективных решений требуются адекватные модели и методы расчета технологических систем. Известны подходы к моделированию теплообмена в многоступенчатых аппаратах с многокомпонентными теплоносителями, на основе которых могут выполняться проверочные расчеты сложных систем. Однако наряду с проведением проверочного расчета часто возникает необходимость проведения проектных расчетов, в ходе которых решаются задачи повышения эффективности функционирования таких систем. Постановка оптимизационных задач выбора оптимальной структуры и режима работы теплообменных установок и их использование при выполнении проектных расчетов является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

Материалы и методы. Для моделирования теплообменных систем используются матричные уравнения баланса массы и энергии, для решения оптимизационных задач применяются методы математического программирования.

Результаты. В рамках ранее разработанной модели тепломассообмена в многоступенчатых теплообменных аппаратах с многокомпонентными теплоносителями сформулирована и решена задача оптимизации структуры и режима работы тепломассообменных систем для теплоносителей, состоящих из смеси компонентов с разной температурой кипения. Представлено решение данной задачи, позволяющее оценить эффективность технологической системы по выбранной целевой функции.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы в энергетической, химической и пищевой отраслях промышленности для повышения эффективности ресурсо- и энергосберегающих технологий при получении товарных продуктов с допустимым содержанием примесей.

Ключевые слова: целевая функция, параметры оптимизации, математическая модель, тепломассообменные системы, баланс энергии, баланс массы, многокомпонентные смеси, ректификация, многоступенчатые системы

Aleksei Evgenyevich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

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

Maria Sergeevna Shumilova

Ivanovo State State University of Chemical Technology, the master's student, Russia, Ivanovo, e-mail: bobrova_m_s@mail.ru

Evgeny Vitalievich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of the Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Anton Nikolaevich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor of the Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: ab_pm@mail.ru

Optimization of the structure and mode of operation of complex heat and mass transfer multicomponent systems

Abstract

Background. To conduct computational research in the search for effective solutions, adequate models and methods for calculating technological systems are required. Known approaches to modeling heat and mass transfer in multi-stage devices with multicomponent fluids, based on which verification calculations of complex systems can be performed. However, along with the verification calculation, the necessity of carrying out design calculations often arises, during which the tasks of increasing the efficiency of the functioning of such systems are solved. The formulation of optimization problems of choosing the optimal structure and operating mode of heat and mass transfer plants and their use in performing design calculations is an urgent task facing the energy sector and related industries.

Materials and methods. To simulate heat and mass transfer systems, the matrix equations of mass and energy balance are used, and mathematical programming methods are used to solve optimization problems.

Results. In the framework of the previously developed model of heat and mass transfer in multistage heat exchangers with multicomponent heat transfer media, the problem of optimizing the structure and operating modes of the system of such heat transfer apparatuses consisting of a mixture of components with different boiling points is formulated and solved. An example of solving this problem is given, which allows one to evaluate the efficiency of component separation and the quality of finished products for the selected objective function.

Conclusions. The results can be used in the energy, chemical and food industries to increase the efficiency of resource and energy saving technologies and to obtain pure components with a normalized impurity content in solving problems of choosing the optimal structures and operating modes of similar systems.

Key words: objective function, optimization parameters, mathematical model, heat and mass transfer systems, energy balance, mass balance, multicomponent mixtures, rectification, multistage systems

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.055-063

Введение. В ряде технологий в энергетической, нефтехимической и пищевой отраслях промышленности из исходного сырья требуется получить несколько готовых продуктов, каждый из которых обладает своими потребительскими свойствами. В энергетике примером таких технологий являются системы оптимального распределения тепловой и электрической нагрузок между энергетическими агрегатами или технология приготовления и фракционирования топлива для эффективного его сжигания. На нефтеперерабатывающих заводах в ректификационных установках происходит разделение нефти и нефтепродуктов на компоненты или фракции, которые имеют разные температуры кипения: бензин, керосин, лигроин, дизельное топливо, мазут и др. [1–5]. Производительность по готовым продуктам и экономическая эффективность таких систем могут существенно зависеть от структуры технологической схемы и режима ее функционирования. Мероприятия, направленные на совершенствование таких технологий, наиболее эффективно могут быть реализованы на основе простых и адекватных моделей и методов расчета, позволяющих учитывать специфику анализируемых процессов. Разработка и реализация оптимальных технологий получения готовых продуктов требуемого качества является актуальной задачей для пищевой, химической и энергетической отраслей промышленности.

Объектом предлагаемого исследования являются многопоточные многоступенчатые системы тепломассообмена [6–11]. В качестве предмета исследования рассматривается постановка и решение задач оптимизации многоступенчатых тепломассообменных систем, в которых в качестве одного из теплоносителей используется смесь компонентов с разными температурами кипения [4–6].

Целью исследования является повышение эффективности проектирования и функционирования многопоточных многоступенчатых систем, где один из теплоносителей является смесью компонентов с разными температурами кипения.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- постановка задачи оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппара-

тов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью;

- решение оптимизационной задачи для многоступенчатой системы тепломассообмена, один из теплоносителей которой представлен смесью компонентов с разными температурами кипения.

Методы исследования. Для моделирования тепломассообменных систем используются уравнения баланса массы и энергии и методология матричной формализации расчета и анализа сложных технологических систем с произвольной конфигурацией связей между подсистемами [7–11], для решения оптимизационных задач применяются методы математического программирования [12–14].

При постановке оптимизационных задач и анализе их решения используется следующая терминология [6]. При классификации систем по числу ступеней выделяются одноступенчатые и многоступенчатые системы. К многоступенчатым относятся системы, которые включают две и более ступеней. По числу компонентов выделяются однокомпонентные и многокомпонентные системы. К многокомпонентным системам относятся системы, в которых в качестве одного из теплоносителей рассматривается смесь компонентов с разными температурами кипения. По числу потоков теплоносителей системы подразделяются на однопоточные, двухпоточные и многопоточные. Основное внимание в работе уделяется исследованию многокомпонентных и многоступенчатых тепломассообменных систем.

Ранее нами разработан подход к моделированию тепломассообмена в многоступенчатых теплообменных аппаратах с многокомпонентными теплоносителями [6]. Ниже предлагается развитие подхода путем постановки и решения оптимизационных задач на основе разработанных математических моделей.

В общем виде задача выбора оптимальных технологических систем может быть сформулирована следующим образом [7, 14]. Обозначим через α – вектор известных параметров, x – искомый вектор решений как совокупность искомых параметров, W – целевую функцию или показатель эффективности решения, u – управление (регулирование) процессом. При заданном комплексе условий α найти такое решение $x = x^*$, которое при управлении

процессом и обеспечивает экстремальное значение показателя эффективности W . Математическая запись постановки задачи представляется в виде

$$W = W(\alpha, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \Rightarrow \max_{\mathbf{x}}. \quad (1)$$

Для исследуемых теплообменных систем общая формулировка задачи (1) конкретизируется следующим образом. В качестве целевой функции предлагается использовать суммарную экономическую эффективность функционирования системы, которая определяется суммой произведений производительности системы по i -му готовому продукту B_i на его стоимостной показатель c_i :

$$W = \sum_i c_i B_i(\alpha, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \Rightarrow \max_{\mathbf{x}}. \quad (2)$$

В качестве искомого вектора решений предлагается набор параметров, который однозначно определяет структуру системы и режим ее работы. Искомый вектор \mathbf{x} представляется как совокупность двух векторов $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2]$, первый из которых \mathbf{x}_1 определяет структуру системы, а второй \mathbf{x}_2 – режим ее работы. Предложенная запись означает объединение компонентов вектора \mathbf{x}_1 и компонентов вектора \mathbf{x}_2 в вектор \mathbf{x} , при этом число компонентов (проекций) искомого вектора \mathbf{x} определяется суммой числа проекций векторов \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 . При анализе только структуры системы фиксируются режимные параметры ($\mathbf{x}_2 = \text{const}$), а при оптимизации только режима фиксируется набор параметров, определяющий структуру системы ($\mathbf{x}_1 = \text{const}$). Такое представление вектора искомых параметров позволяет решение сложной задачи одновременной оптимизации режима и структуры разбить на последовательное решение двух и более простых задач: структурной и режимной оптимизации.

Без ущерба для общности подхода к постановке оптимизационной задачи дальнейший анализ будем проводить на примере систем ректификации нефти [1–6]. Ректификация – это процесс многократного испарения и конденсации, в ходе которого исходная смесь разделяется на два или более компонентов. При этом паровая фаза насыщается легколетучим (низкокипящим) компонентом, а жидкая часть смеси – тяжелолетучим (высококипящим) компонентом. Принцип действия и схема потоков в ректификационных колонках проиллюстрированы на рис. 1, а.

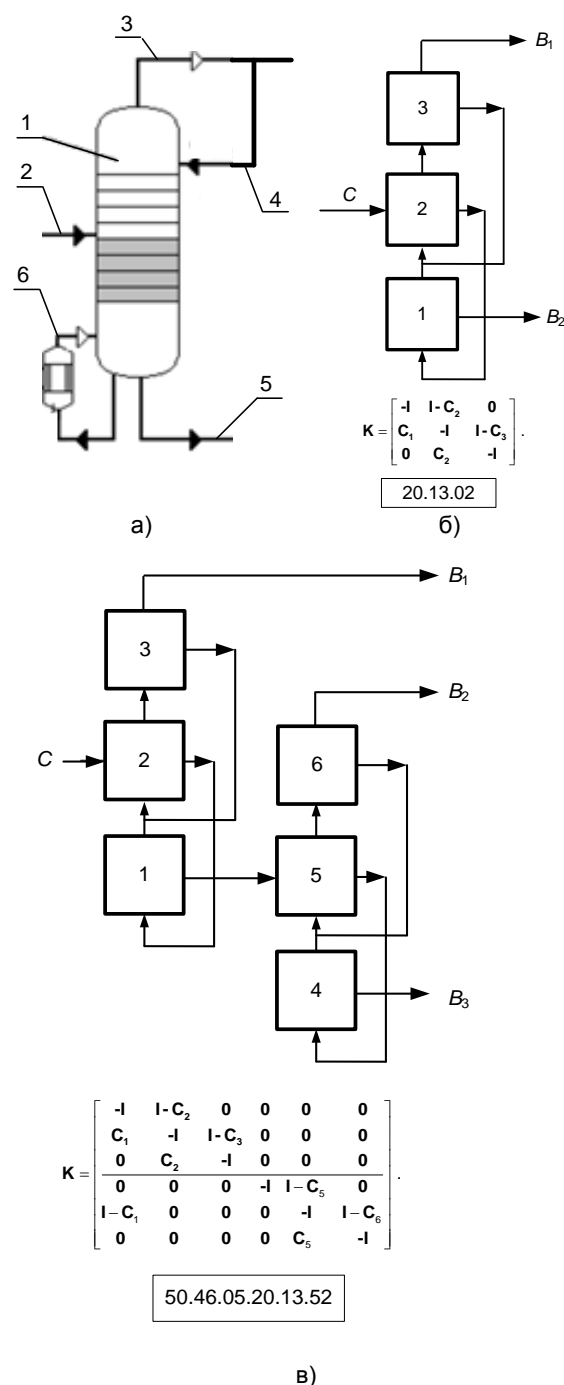


Рис. 1. Ректификационная колонка (а), расчетная схема модели одной колонки (б), расчетная схема системы из двух колонок (в): 1 – ректификационная колонка; 2 – исходная смесь (питание); 3 – дистиллят; 4 – флегма; 5 – кубовый остаток; 6 – испаритель кубового остатка; C – подача сырья; B_i – выход i -го готового продукта

Исходная смесь поступает в колонну 1 в качестве питания 2. Пары 3 поднимаются в верхнюю часть колонны, охлаждаются, конденсируются в холодильнике-конденсаторе и подаются обратно на верхнюю тарелку колонны в качестве орошения (флегмы) 4. Продукт, обогащенный легкокипящим компонентом, называют дистил-

лятом. Для создания восходящего потока паров в нижней части колонны часть кубовой жидкости 5 направляют в теплообменник 6, а образовавшиеся пары подают под нижнюю тарелку колонны. Если исходный продукт состоит из двух компонентов, конечными продуктами являются дистиллят и кубовый остаток. Для многокомпонентных смесей обычно используются несколько ректификационных колонок. Схема системы для выделения трех продуктов, состоящей из двух колонок, приведена на рис. 1,в.

Для описания набора искомых параметров, определяющих структуру системы, предлагается использовать код, который с помощью специально разработанной системы кодификации [7, 15] позволяет однозначно определить структуру системы. При этом искомый вектор параметров структуры системы x_1 записывается в виде кода. Система кодификации представлена следующими правилами, которые позволяют для любой структуры технологической схемы однозначно сформировать код, а по коду восстановить структуру системы.

1. Система разбивается на подсистемы или ступени, каждой из которых присваивается номер. Каждая ступень имеет один вход и два выхода: дистиллят и кубовый остаток. При числе выходящих потоков более двух ступень дополнительно разбивается на более мелкие фрагменты таким образом, чтобы число выходных потоков было равно двум. Любой выход ступени может направляться на вход любой другой ступени или покидать систему.

2. Код состоит из ячеек, разделенных знаками (например, точками). Каждая ячейка соответствует предварительно пронумерованным элементам схемы; возрастание номера ступени в коде идет справа налево. Код структуры записывается набором цифр.

3. В ячейке для каждой ступени размещается два числа: справа – номер элемента, в который уходит поток низкокипящей фракции (дистиллята), слева – номер элемента, в который уходит поток высококипящей фракции (кубового остатка) ступени.

4. Если после какого-либо элемента один или несколько потоков покидают схему, то в соответствующем месте кода ставится ноль.

Расчетная схема для одной ректификационной колонки, представленной тремя ступенями, и код ее структуры, построенный

по разработанным правилам кодификации, приведены на рис. 1,б. Код системы из трех ступеней состоит из 6 цифр, разделенных попарно точками: две правые цифры относятся к первой, две средние – ко второй и две левые – к третьей ступени расчетной схемы. Правая цифра каждой пары показывает номер ступени, в которую направляется после ступени низкокипящая фракция (дистиллят), а вторая – номер ступени, в которую направляется высококипящая фракция (кубовый остаток). Следует отметить, что в модели каждая ступень может соответствовать отдельной тарелке колонны, а можно несколько тарелок объединить в одну расчетную ступень. Увеличение числа ступеней усложняет расчет, но зато позволяет получить более подробные данные о процессе ректификации.

При разделении сырья на три и более продукта используются системы из нескольких колонок. Расчетная схема системы из двух ректификационных колонок приведена на рис. 1,в. Согласно этой схеме, из первой колонки дистиллят сразу выделяется в готовый продукт B_1 , а кубовый остаток подается на вход второй колонки, на выходе которой получается еще два готовых продукта B_2 и B_3 . Расчетная схема системы включает шесть ступеней, а ее код – двенадцать цифр. При увеличении числа ступеней более десяти цифры заменяются на числа или буквы с сохранением принципов построения кода.

Предложенный подход позволяет однозначно кодировать любую структуру технологической схемы и автоматизировать процедуру составления ее матричной математической модели [6].

Для описания вектора искомых режимных параметров системы (x_2) используются параметры модели, разработанной в рамках матричной формализации [6]. Основные положения модели, необходимые для понимания постановки и решения оптимизационной задачи, представлены ниже.

Многокомпонентные теплоносители в нефтехимии характеризуются массовым содержанием компонентов (фракций) с разными температурами кипения. Фракционный состав нефтепродуктов по истинным температурам кипения (ИТК) является одной из важных и широко используемых характеристик нефти [3]. Состав нефти по ИТК выражается в виде дискретных значений массового распределения фракций по тем-

пературам кипения. Интегральная кривая вероятности $F(\Theta)$ показывает массовую долю смеси, у которой температура кипения ниже Θ . Для расчета фракционных составов продуктов в любой точке системы из n ступеней при анализе m фракций нефтепродуктов используется матричная модель [6]

$$\mathbf{K} \mathbf{F} = -\mathbf{F}_0, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} & \dots & \mathbf{C}_{1n} \\ \mathbf{C}_{21} & -\mathbf{I} & \mathbf{C}_{23} & \dots & \mathbf{C}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{C}_{n1} & \mathbf{C}_{n2} & \mathbf{C}_{n3} & \dots & -\mathbf{I} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

здесь \mathbf{K} – технологическая матрица размера $n \times n$ блоков или $mn \times mn$ элементов; \mathbf{C} – диагональная матрица размера $m \times m$, на главной диагонали которой находятся вероятности попадания соответствующих фракций в дистиллят; \mathbf{I} – единичная матрица размера $m \times m$; матрица \mathbf{C}_{ik} соответствует матрице \mathbf{C} для k -го элемента, i – номер элемента схемы, на вход которого подается материал с выхода k -го элемента. Если материал из k -го элемента не попадает в i -й, то соответствующее слагаемое в уравнении принимает нулевое значение; \mathbf{F} – блочная матрица-столбец размера $n \times 1$ блоков-столбцов или $mn \times 1$ элементов, описывающая фракционные составы продуктов на входе во все n элементов схемы; \mathbf{F}_0 – блочная матрица такого же размера, описывающая фракционные составы внешних продуктов, подаваемых в систему.

Для описания процесса ректификации в ступени используется вероятностная оценка [16, 17] попадания фракции в дистиллят. В качестве основной характеристики разделения в ступени применяется кривая разделения ректификации $\Theta(\varphi)$, значение которой показывает вероятность перехода в дистиллят фракции с температурой кипения Θ . Для аппроксимации кривой $\Theta(\varphi)$ предлагается зависимость [18]

$$\varphi(\Theta) = \frac{1}{1 + (\Theta/\Theta_0)^{k_s}}, \quad (5)$$

где Θ_0 – граничное или медианное значение температуры, при которой вероятность фракции перейти в дистиллят равна 0,5; k_s – параметр эффективности или острота разделения, которая характеризует качество процесса.

Матрица \mathbf{C} вычисляется через кривую разделения (5) согласно выражению

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \varphi_1(\Theta) & \dots & 0 \\ \dots & \varphi_j(\Theta) & \dots \\ 0 & \dots & \varphi_m(\Theta) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

С учетом (4), (6) решение системы (3) может быть представлено в виде

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K}^{-1} \mathbf{F}_0, \quad (7)$$

где \mathbf{K}^{-1} – матрица, обратная \mathbf{K} .

Выражение (7) позволяет рассчитать фракционные составы и производительности продуктов в произвольной точке системы, а при заданной стоимости готовых продуктов определить значение целевой функции оптимизации согласно (2).

Вид матриц \mathbf{K} для двух анализируемых систем представлен на рис. 1 под соответствующими расчетными схемами. Сама матрица \mathbf{K} может быть построена согласно универсальному алгоритму для всех возможных вариантов схем, содержащих ступени ректификации, узлы питания и выхода готового продукта [6].

Вектор \mathbf{x}_2 режимных параметров оптимизации предлагается в рамках рассматриваемой матричной модели представить распределением температур Θ_0 по ступеням:

$$\mathbf{x}_2 = [\Theta_{01} \quad \Theta_{02} \quad \dots \quad \Theta_{0n}]. \quad (8)$$

Уравнения (2)–(8) представляют математическую формулировку оптимизационной задачи систем многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которых представлен многокомпонентной смесью.

Результаты. Алгоритм и результаты решения сформулированной задачи рассматриваются более подробно для системы, состоящей из двух ректификационных колонок (рис. 1, в). Число ступеней в расчетном примере равно шести ($n = 6$), число контролируемых фракций – семнадцати ($m = 17$). В ходе решения задачи для выбранной структуры ($\mathbf{x}_1 = \text{const}$) необходимо определить вектор режимных параметров ($\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_2^*$), которому соответствует максимальное значение целевой функции (2). В качестве искоемых режимных параметров рассматривается распределение температур (8) по шести ступеням. Эффективность

разделения для каждой ступени системы принимается одинаковой: $k_{sj} = 30$.

Сформулированная оптимизационная задача (2) решается численно методом Монте-Карло (ММК) [12–14, 19] согласно следующему алгоритму.

1. Случайным образом генерируется вектор искомых решений, каждое значение которого выбирается в заданном диапазоне технологических ограничений.

2. Согласно (7) рассчитываются фракционные составы, доли и производительности по готовым продуктам. Проводится проверка выполнения технологических требований по готовым продуктам. Если ограничения не выполняются, то сгенерированный вариант бракуется и в дальнейшем анализе не участвует.

3. Согласно (2) определяется значение целевой функции оптимизации, которое сравнивается с максимальным значением. При расчете целевой функции считается, что ценность первого, второго и третьего продуктов в условных единицах составляет: $c_1 = 3$; $c_2 = 2$; $c_3 = 1$.

4. Если текущее значение целевой функции оказывается больше максимального, то максимальное значение обновляется.

5. Пункты 1, 2, 3, 4 выполняются заданное число раз или до достижения заданного значения целевой функции.

Для численного решения оптимизационной задачи (2)–(8) по предложенному алгоритму разработана компьютерная программа для его реализации в среде MATLAB. Результаты расчетного анализа приведены на рис. 2, 3.

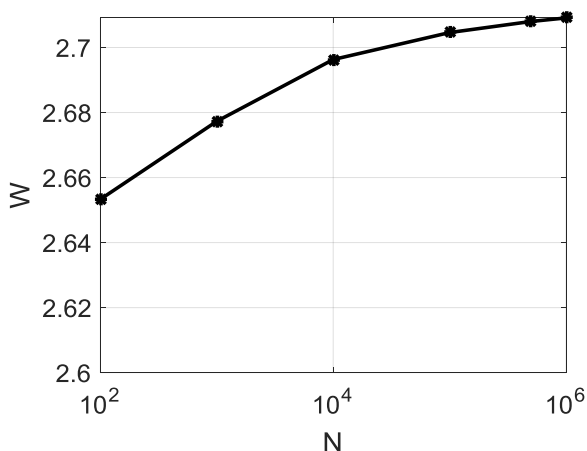


Рис. 2. Зависимость максимального значения целевой функции оптимизации от числа генераций вектора решения N

На стадии предварительных исследований проверялась сходимость метода к оптимальному решению. На рис. 2 показана зависимость максимального значения целевой функции от числа генераций N , которое варьировалось в ходе численных экспериментов от 10^2 до $2 \cdot 10^6$. Анализ зависимости показывает, что при числе генераций порядка 10^6 значение целевой функции стабилизируется.

Найденное оптимальное решение представлено на рис. 3 в виде фракционных составов трех целевых продуктов, которым соответствует максимальное значение целевой функции $W_{\max} = 2,7091$. Производительности по готовым продуктам в долях от производительности исходного питания составили: $B_1 = 0,7101$; $B_2 = 0,2829$; $B_3 = 0,007$. При этом вектор оптимального распределения температур по ступеням имеет вид $x_2^* = [214,24 \ 188,80 \ 51,60 \ 323,97 \ 229,76 \ 149,66]$, °C.

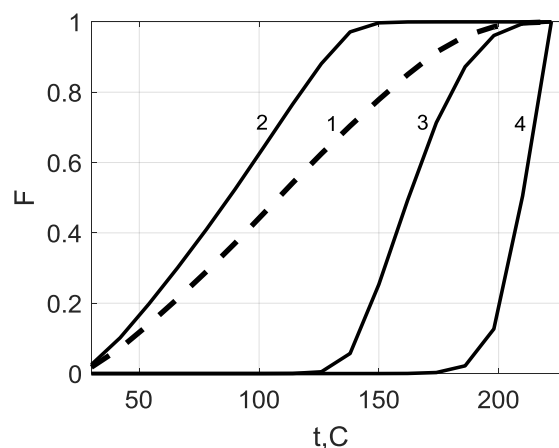


Рис. 3. Результаты решения оптимизационной задачи в виде фракционного состава питания (1) и фракционных составов дистиллята первой колонки (2), дистиллята второй колонки (3) и кубового остатка второй колонки (4)

Анализ зависимостей (рис. 3) показывает, что полученные результаты достоверно описывают процесс ректификации для многоступенчатой установки. Первый готовый продукт (B_1) по фракционному составу (кривая 2) соответствует бензиновой фракции, которая выкипает в пределах 40–150 °C, используется как компонент товарного автомобильного бензина. Вторым продуктом (B_2) – керосиновая фракция (кривая 3), которая выкипает в пределах 140–220 °C, используется как топливо для реактивных и тракторных карбюраторных двигателей. Третий продукт (B_3) близок по своим характеристикам к дизельной фрак-

ции (кривая 4) (легкий или атмосферный газойль, соляровый дистиллят), которая выкипает в пределах 180–220 °С, используется как топливо.

В качестве ограничений предложенного подхода следует отметить необходимость проведения дополнительных исследований, направленных на практическую реализацию оптимальных решений и на предварительное определение кривых разделения для отдельных тарелок или некоторой их совокупности.

Выводы. В рамках проведенных исследований сформулирована задача оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью; получено ее решение для системы из двух ректификационных колонок, проведен анализ полученных результатов. Представленный подход позволяет исследовать и оптимизировать многопоточные многоступенчатые установки, варьируя число ступеней, распределение значений температур по ступеням. Полученные результаты могут быть использованы в энергетической [7, 20], химической и пищевой [3, 4, 21] отраслях промышленности для повышения эффективности ресурсо- и энергосберегающих технологий и получения товарных продуктов с допустимым содержанием примесей.

Список литературы

1. Майков В.П., Моругин К.К. Ректификация непрерывных смесей. Системно-информационный подход. – М.: МИХМ, 1979. – 88 с.
2. Поляков К.М., Носенко В.Н. Влияние различных видов питания ректификационных колонн на энергопотребление установки первичной переработки нефти // Вестн. Ом. ун-та. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 53–59.
3. Кирсанов Ю.Г., Шишов М.Г., Коняева А.П. Анализ нефти и нефтепродуктов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 88 с.
4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2006. – 829 с.
5. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2011. – 1230 с.
6. Матричный метод расчета сложных тепломассообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, М.С. Шумилова и др. // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 1. – С. 59–68.
7. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
8. Жуков В.П., Барочкин А.Е., Беляков А.Н. Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 116–119.
9. Клинов А.В., Разинов А.И. Никешин В.В. Моделирование многокомпонентного массопереноса при ректификации в насадочных колоннах на основе потенциалов межмолекулярного взаимодействия // Вестник Казанского технологического университета. – 2002. – № 1–2. – С. 382–388.
10. Шарпов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.
11. Разработка математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях / К.А. Касаткин, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.Г. Орлов // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 61–67.
12. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973. – 500 с.
14. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит., 1981. – 488 с.
15. Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.
16. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – Иваново, 2014. – 160 с.
17. Бобков С.П. Применение вероятностных подходов для моделирования технологических процессов // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. – 2005. – Т. 48, № 7. – С. 105–112.
18. Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Жуков В.П. Обоснование выбора зависимости, используемой для аппроксимации кривой разделения Тромпа // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 15–23.
19. Таха Х. Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.
20. Analysing the thermal state of voltage transformer based on resistive voltage divider/ V. Lebedev, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21st International Conference for Students and Young Scientists. – 2015. – С. 01202.
21. HYSYS. Process, версия 2.4. Базис. – М.: ЗАО «Технефтехим», 2001. – 257 с.

References

1. Maykov, V.P., Morugin, K.K. *Rektifikatsiya nepreryvnykh smesey. Sistemno-informatsionnyy podkhod* [Rectification of continuous mixtures. System-information approach]. Moscow: MIKhM, 1979. 88 p.
2. Polyakov, K.M., Nosenko, V.N. *Vestnik Omskogo universiteta*, 2018, vol. 23, no. 1, pp. 53–59.
3. Kirsanov, Yu.G., Shishov, M.G., Konyayeva, A.P. *Analiz nefti i nefteproduktov* [Analysis of oil and oil products]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2016. 88 p.
4. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 2006. 829 p.
5. Komissarov, Yu.A., Gordeev, L.S., Vent, D.P. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 2011. 1230 p.
6. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Shumilova, M.S., Barochkin, E.V., Belyakov, A.N. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 59–68.
7. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
8. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, no. 11, pp. 116–119.
9. Klinov, A.V., Razinov, A.I. Nikeshin, V.V. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2002, no. 1–2, pp. 382–388.
10. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ul'yanovsk: UIGTU, 2003. 560 p.
11. Kasatkin, K.A., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Orlov, G.G. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 61–67.
12. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: objectives, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.
13. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematics Handbook (for scientists and engineers)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 500 p.
14. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical System Analysis Tasks]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981. 488 p.
15. Mizonov, V.E., Zhukov, V.P., Bernotat, S. *Simulation of Grinding: New Approaches*. Ivanovo, 1997. 108 p.
16. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic powder classification]. Ivanovo, 2014. 160 p.
17. Bobkov, S.P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2005, vol. 48, no. 7, pp. 105–112.
18. Shuvalov, S.I., Novosel'tseva, S.S., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 15–23.
19. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.
20. Lebedev, V., Zhukov, V., Yablokov, A. *Analysing the thermal state of voltage transformer based on resistive voltage divider*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21st International Conference for Students and Young Scientists, 2015, pp. 01202.
21. HYSYS. Process, versiya 2.4. Bazar. Moscow: ZAO «Tekhneftekhim», 2001. 257 p.

УДК 517.912:621.65.05

Владимир Аркадьевич Наумов

ФГБОУВО «Калининградский государственный технический университет», доктор технических наук, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, Россия, Калининград, e-mail: van-old@mail.ru

Анализ нестационарной математической модели простой гидравлической сети с центробежным насосом

Авторское резюме

Состояние вопроса. Простые гидравлические сети с центробежным насосом не только являются частью сложных сетей, но и широко применяются в автономных системах водоснабжения и канализации. Математическая модель простых сетей с учетом переменного уровня жидкости в резервуарах включает известное уравнение Бернулли для нестационарных течений. Опубликованные по данной проблеме работы не учитывают нестационарный характер течения из-за переменного уровня жидкости. Условия использования квазистационарной модели не обсуждаются. Не найдены критерии подобия задачи. В связи с этим целью исследования является анализ нестационарной математической модели объекта, включая определение критериев подобия задачи и их влияния на решение.

Материалы и методы. В качестве математической модели простой гидравлической сети использованы известные уравнения: баланса количества жидкости и Бернулли для нестационарных течений с плавно изменяющимися характеристиками. Напорная характеристика центробежного насоса аппроксимирована хорошо зарекомендовавшей себя в предыдущих исследованиях зависимостью в виде квадратного трехчлена. Система дифференциальных уравнений приведена к безразмерной форме. Для решения поставленной задачи использованы аналитические и численные методы.

Результаты. Проведен анализ математической модели перекачивания жидкости центробежным насосом в простой гидравлической сети с учетом переменного уровня жидкости. С использованием безразмерной формы системы уравнений определены три критерия подобия задачи, в том числе аналог числа Струхала Str . В квазистационарной постановке ($Str = 0$) найдено аналитическое решение задачи Коши. Решение задачи в полной постановке получено численным методом. Приведены результаты исследования влияния критериев подобия на решение. Установлено, что с увеличением значений Str падает безразмерный расход жидкости, при этом увеличивается предельный объем жидкости и время его достижения; увеличение значений двух других критериев приводит к росту и расхода, и предельного объема жидкости, следовательно, пользоваться аналитическим решением в квазистационарной постановке можно лишь при $Str < 0,1$.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автономных систем водоснабжения и канализации. Перспективным представляется продолжение исследований для неавтономной области гидравлического сопротивления, а также при переменной вязкости жидкости.

Ключевые слова: простая гидравлическая сеть, центробежный насос, переменный уровень жидкости, нестационарное течение, математическая модель, задача Коши, критерии подобия

Vladimir Arkad'evich Naumov

Kaliningrad State Technical University, Doctor of Technical Science, Head of Water resources and water use Department, Russia, Kaliningrad, e-mail: van-old@mail.ru

Analysis of the non-stationary mathematical model of a simple hydraulic network with a centrifugal pump

Abstract

Background. Simple hydraulic networks with a centrifugal pump are not only part of complex networks, but are also widely used in Autonomous water supply and Sewerage systems. The mathematical model of simple networks taking into account the variable level of liquid in reservoirs includes the well-known Bernoulli equation for non-stationary flows. Published works on this problem do not take into account the non-stationary nature of the flow due to the variable liquid level. The conditions for using the quasi-stationary

model are not discussed. Similarity criteria for the issue were not found. The purpose of the study is to analyze the non-stationary mathematical model of the object, including the definition of criteria for similarity of the problem and their impact on the solution.

Materials and methods. The well-known equations of fluid quantity balance and Bernoulli for non-stationary flows with smoothly changing characteristics were used as a mathematical model of a simple hydraulic network. The pressure characteristic of a centrifugal pump is approximated by a well-established dependence in the form of a square three-member. The system of differential equations was reduced to a dimensionless form. Analytical and numerical methods were used to solve the problem.

Results. The analysis of the mathematical model of pumping liquid by a centrifugal pump in a hydraulic network with a variable level was carried out. The dimensionless form of the system of equations allowed us to determine three similarity criteria for the problem, including the analog of the Struhal number Str . The analytical solution to the Cauchy problem is found in the quasi-stationary formulation ($Str = 0$). The solution of the problem in the full statement is obtained by the numerical method. The results of the study of the influence of similarity criteria on the solution are presented. The dimensionless flow rate of the liquid decreases with increasing Str values. In this case, the maximum volume of liquid and the time to reach it increases. Increasing the values of the other two criteria leads to an increase in both the flow rate and the maximum volume of the liquid. The analytical solution in the quasi-rational formulation can be used only for $Str < 0,1$.

Conclusions. The results obtained can be used in the design of Autonomous Water supply and Sewerage systems. Further research for the non-self-similar area of hydraulic resistance and for variable fluid viscosity is promising.

Key words: simple hydraulic network, centrifugal pump, variable liquid level, non-stationary flow, mathematical model, Cauchy problem, similarity criteria

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.064-070

Состояние вопроса. Гидравлические сети широко применяются в различных отраслях. Их математическое моделирование в целях повешения эффективности использования является одним из приоритетных направлений исследований [1–4]. Важное направление – моделирование нестационарных процессов в гидравлических сетях. Как известно, нестационарные процессы в гидравлических сетях разделяют на быстро протекающие (в частности, гидравлический удар) и медленно протекающие. В последнем случае характеристики течения (скорости, давление) меняются плавно по времени. Такие задачи распространены в инженерных приложениях, решаются с помощью нестационарного уравнения Бернулли. Причем большая часть публикаций относится к моделированию больших и сложных гидравлических систем (например, [5–8]).

Значительно меньше публикаций посвящено анализу нестационарной работы простой гидравлической сети с центробежным насосом (ПГСЦН), показанной на рис. 1. Хотя такая схема не только является составляющей сложных сетей, но и непосредственно применяется, например, в автономных системах водоснабжения.

В [9] сформулирована система уравнений, описывающая нестационарный процесс перекачивания жидкости в ПГСЦН с

предварительно наполненным трубопроводом. Однако при решении задачи изменение статического напора $H(t)$ не учитывается. Исследуется нестационарный процесс, обусловленный только вариацией частоты вращения рабочего колеса ЦН.

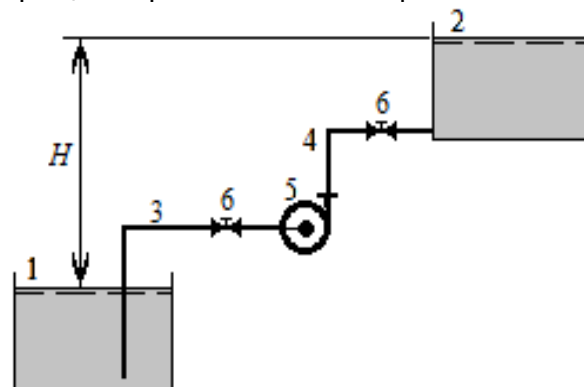


Рис. 1. Схема гидравлической сети: 1 – исходная емкость; 2 – приемная емкость; 3 – всасывающий трубопровод; 4 – нагнетательный трубопровод; 5 – ЦН; 6 – вентиль

В [10] изначально задача решается в квазистационарной постановке: в уравнении Бернулли не учитывается слагаемое, обусловленное нестационарным характером течения. Погрешность такого упрощения модели не обсуждается. В [10] допущена ошибка: в отличие от схемы рис. 1, рассчитывается схема, в которой нагнетательный трубопровод 4 имеет выход в при-

емный резервуар выше уровня жидкости; статический напор считается не до указанного выхода, а до верхнего уровня жидкости, как на схеме рис. 1. Кроме того, при такой схеме необходимо учитывать скоростной напор на выходе нагнетательного трубопровода.

Целью настоящего исследования является анализ нестационарной математической модели ПГСЦН при переменном уровне жидкости в резервуарах, включая определение критериев подобия задачи и их влияния на ее решение.

Материалы и методы. Рассмотрим ПГСЦН, показанную на рис. 1. Полагаем, что условия отсутствия кавитации выполнены. Режим течения жидкости – турбулентный, область гидравлического сопротивления – квадратичная. Давление на поверхности жидкости обоих резервуаров – атмосферное.

Дифференциальное уравнение для объема перекачиваемой жидкости V с начальным условием имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = Q, \quad V(0) = 0, \quad Q = W S_0, \quad (1)$$

где Q , W – объемный расход и скорость жидкости в трубопроводе соответственно; t – время; S_0 – площадь поперечного сечения трубопровода.

Положим, что на всем протяжении потока движение жидкости является плавно изменяющимся, тогда нестационарное уравнение Бернулли также представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка [11]:

$$\frac{L}{g} \frac{dW}{dt} = H_p - H - \zeta \frac{W^2}{2g}, \quad W(0) = 0, \quad (2)$$

где L – общая длина трубопровода; g – ускорение свободного падения; H_p – мгновенное значение напора насоса; H – текущая разность уровней; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления сети.

Для зависимости напора насоса от подачи используем хорошо зарекомендовавшее себя выражение:

$$H_p \equiv f(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2, \quad (3)$$

где a_0 , a_1 , a_2 – размерные эмпирические коэффициенты, определяемые для заданной модели ЦН по напорной характеристике, причем $a_0 > 0$, $a_2 < 0$ [4, 12].

Как в [11], полагаем, что гидравлическое сопротивление сети при нестационарном течении можно приближенно считать таким же, как и при стационарном. Коэффициент гидравлического сопротивления сети в квадратичной области считается постоянным и может быть определен по известной формуле

$$\zeta = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} \frac{L}{d} + \sum_i \zeta_{Mi}, \quad (4)$$

где d – диаметр трубопровода; Δ – эквивалентная шероховатость; ζ_{Mi} – коэффициенты потерь в местных гидравлических сопротивлениях.

Далее, чтобы не загромождать изложение, полагаем площадь сечения 1-й и 2-й емкости постоянной: $S_1 = \text{const}$, $S_2 = \text{const}$. Текущий перепад уровней зависит от объема перекачанной жидкости:

$$H(t) = H_0 + \frac{V}{S_z}, \quad S_z = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2}, \quad (5)$$

где H_0 – перепад уровней (статический напор) в начальный момент времени.

Подставляя (3) и (5) в (2), получим

$$\begin{aligned} \frac{L}{S_0 g} \frac{dQ}{dt} &= (a_0 - H_0) + a_1 Q - \\ &- (b - a_2) Q^2 - \frac{V}{S_z}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$b = \zeta / (2g S_0^2).$$

Если диаметры всасывающего и нагнетательного трубопровода не равны ($d_1 \neq d_2$), то в качестве S_0 можно выбрать площадь поперечного сечения нагнетательного трубопровода, а отношения d_1/d_2 и L_1/L_2 учесть при расчете коэффициентов, в частности ζ .

Чтобы привести систему дифференциальных уравнений к безразмерной форме, в качестве характерного значения выберем установившийся расход жидкости при неизменных начальных условиях. Для этого правую часть (6) приравняем к нулю, положив $V = 0$. Найдем положительное решение квадратного уравнения

$$a_3 Q^2 - a_1 Q - (a_0 - H_0) = 0; \quad a_3 = b - a_2, \quad (7)$$

$$Q_0 = \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4 \cdot (a_0 - H_0)(b - a_2)}}{2 \cdot a_3}. \quad (8)$$

В [3] используется аппроксимация, подобная (3), но с коэффициентом a_1 , равным нулю. Тогда формула (8) упростится:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{a_0 - H_0}{a_3}}. \quad (9)$$

Введем безразмерные переменные:

$$q = \frac{Q}{Q_0}, \quad \tau = \frac{t}{Q_0 S_z a_3}, \quad v = \frac{V}{Q_0^2 S_z a_3}. \quad (10)$$

Подставив размерные переменные, выраженные из (10), в (1), (2), запишем постановку задачи Коши в безразмерной форме:

$$\text{Str} \frac{dq}{d\tau} = \theta + 2\beta q - q^2 - v, \quad q(0) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = q, \quad v(0) = 0, \quad \beta = \frac{0,5 \cdot a_1}{Q_0 a_3}, \quad (12)$$

$$\text{Str} = \frac{L}{Q_0^2 S_0 S_z a_3^2 g}, \quad \theta = \frac{a_0 - H_0}{Q_0^2 a_3}. \quad (13)$$

Видно, что задача имеет три критерия подобия: β , θ , Str . Str представляет собой аналог числа Струхала.

Результаты. Если число Струхала мало, (11) превращается в квадратное уравнение:

$$\theta + 2\beta q - q^2 - v = 0. \quad (14)$$

Находим из (14) положительное q

$$q(v) = \beta + \sqrt{\beta^2 + \theta - v} \quad (15)$$

и подставляем в (12). Получаем задачу Коши:

$$\frac{dv}{d\tau} = \beta + \sqrt{\beta^2 + \theta - v}, \quad v(0) = 0, \quad (16)$$

которая имеет аналитическое решение:

$$\beta \cdot \ln \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 + \theta - v}}{\beta + \sqrt{\beta^2 + \theta}} + \sqrt{\beta^2 + \theta} - \sqrt{\beta^2 + \theta - v} = \frac{\tau}{2}. \quad (17)$$

При $\beta = 0$ решение (16) представляет собой явные зависимости от времени:

$$v(\tau) = \tau \cdot \sqrt{\theta} - 0,25\tau^2, \quad q(\tau) = \sqrt{\theta} - 0,5\tau, \quad (18)$$

которые показаны на рис. 3–5 штриховыми линиями.

На рис. 2, 3 показана связь безразмерных величин времени и объема пере-

каченной жидкости v при различных значениях критериев подобия θ и β .

В соответствии с (17), величина перекачиваемого объема жидкости ограничена:

$$v \leq \beta^2 + \theta = v_p. \quad (19)$$

Неравенство (19) обусловлено заданной конечной величиной напора ЦН. Но оно справедливо только при $\text{Str} \rightarrow 0$. По (19), предельный объем v_p , который может перекачать насосная установка при заданных условиях, растет с увеличением как β , так и θ . Это видно и на рис. 2, 3.

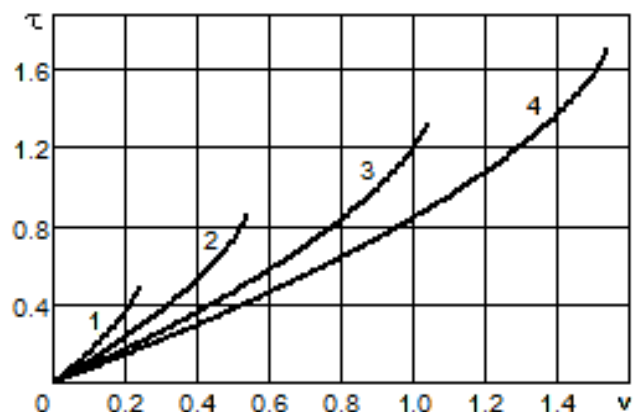


Рис. 2. Связь безразмерного объема и времени по (17) при $\beta = 0,2$: 1 – $\theta = 0,2$; 2 – $\theta = 0,5$; 3 – $\theta = 1,0$; 4 – $\theta = 1,5$

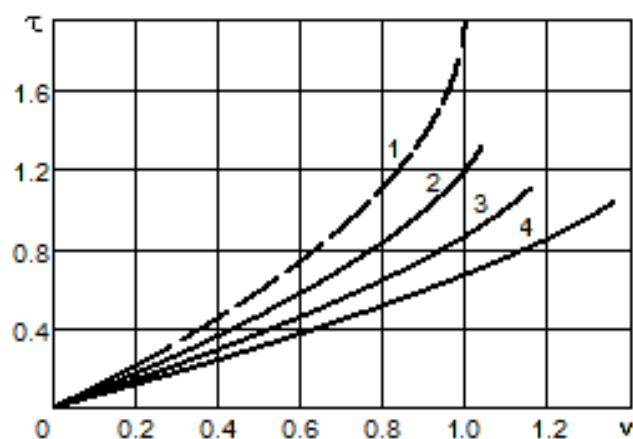


Рис. 3. Связь безразмерного объема и времени по (17) при $\theta = 1,0$: 1 – $\beta = 0$; 2 – $\beta = 0,2$; 3 – $\beta = 0,4$; 4 – $\beta = 0,6$

Результаты решения численным методом нестационарной задачи (11)–(13) при различных значениях критериев подобия представлены на рис. 4–9.

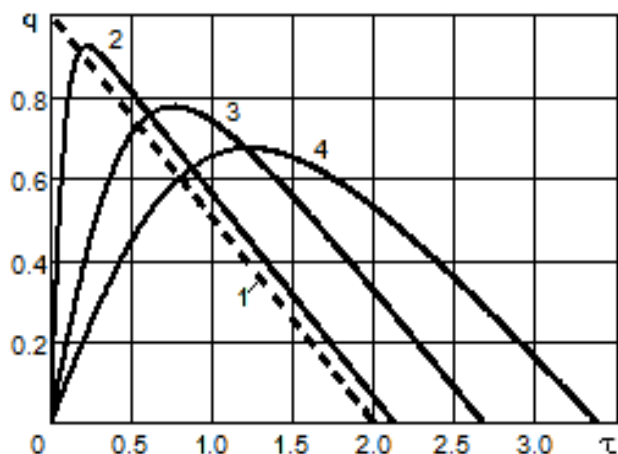


Рис. 4. Изменение безразмерного расхода при $\beta = 0$; $\theta = 1$ и различных значениях числа Струхала: 1 – $Str = 0$; 2 – $Str = 0,1$; 3 – $Str = 0,5$; 4 – $Str = 1,0$

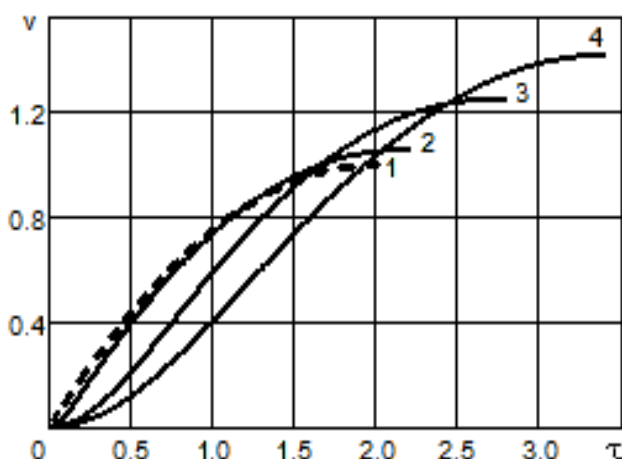


Рис. 5. Изменение безразмерного объема (условия и обозначения, как на рис. 4)

Анализ полученных зависимостей (рис. 4, 5) показывает, что чем больше значение Str , тем значительнее отличие решения задачи в полной постановке от квазистационарного решения, найденного аналитически (штриховые линии). Это отличие становится несущественным лишь при $Str < 0,1$. Возрастание значений Str влечет снижение безразмерного расхода, но при этом увеличивается как объем жидкости, который может быть перекачан насосной установкой, так и время его достижения.

Анализ зависимостей (рис. 6–9) показывает, что увеличение β и θ приводит к росту расхода и предельного объема перекачиваемой жидкости v_p . Время достижения v_p заметно увеличивается с ростом значений Str . Величины β и θ в меньшей

степени влияют на изменение указанного времени.

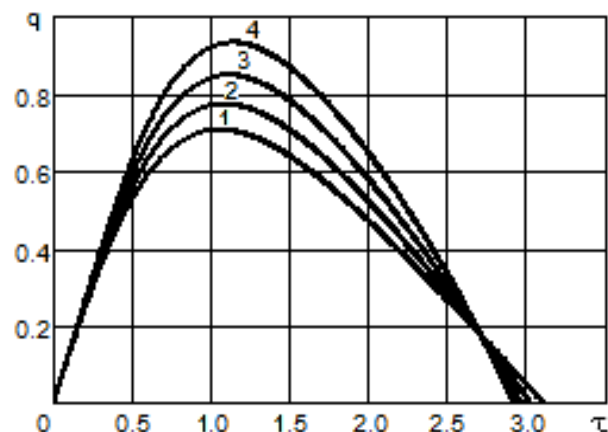


Рис. 6. Изменение безразмерного расхода при $Str = 0,8$; $\theta = 1$ и различных значениях β : 1 – $\beta = 0$; 2 – $\beta = 0,1$; 3 – $\beta = 0,2$; 4 – $\beta = 0,3$

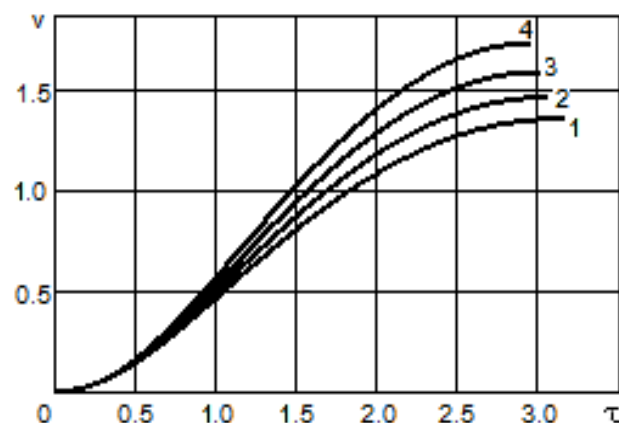


Рис. 7. Изменение безразмерного объема (условия и обозначения, как на рис. 6)

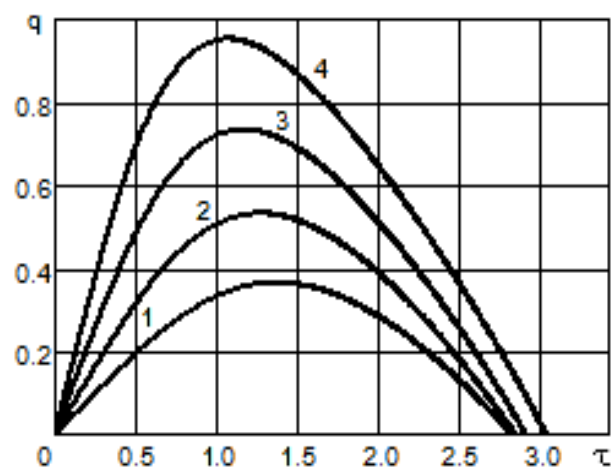


Рис. 8. Изменение безразмерного расхода при $Str = 0,8$; $\beta = 0,2$ и различных значениях θ : 1 – $\theta = 0,3$; 2 – $\theta = 0,6$; 3 – $\theta = 0,8$; 4 – $\theta = 1,2$

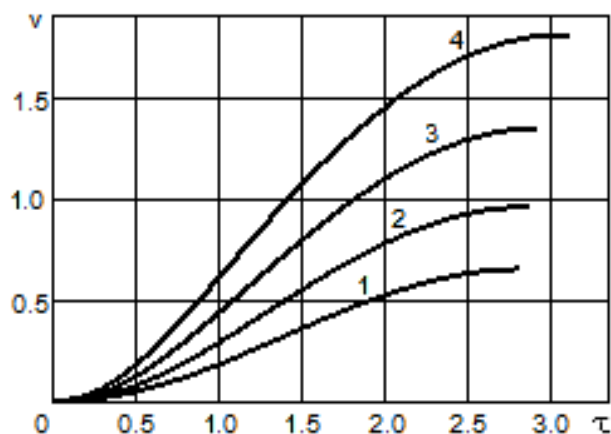


Рис. 9. Изменение безразмерного объема (условия и обозначения, как на рис. 8)

Выводы. Проведенный анализ математической модели перекачивания жидкости центробежным насосом в простой гидравлической сети с учетом переменного уровня позволил сделать следующие выводы. Нестационарная задача Коши имеет три критерия подобия. С увеличением числа Струхала Str падает безразмерный расход жидкости, при этом увеличиваются предельный объем жидкости, который может быть перекачан насосной установкой, и время его достижения. Увеличение значений двух других критериев приводит к росту и расхода, и предельного объема жидкости.

В квазистационарной постановке ($Str = 0$) задача имеет аналитическое решение. Но пользоваться таким упрощением модели можно лишь при $Str < 0,1$.

Заметим, что рассмотренная модель справедлива, если в момент начала работы насоса трубопровод наполнен неподвижной жидкостью. Иначе модель значительно усложнится.

Перспективным представляется продолжение исследований для неавтономной области гидравлического сопротивления и для переменной вязкости жидкости.

Список литературы

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
2. Логинов К.В., Мызников А.М., Файзуллин Р.Т. Расчет, оптимизация и управление режимами работы больших гидравлических сетей // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18, № 9. – С. 92–106.
3. Моделирование режимов эксплуатации насосных станций, оборудованных

центробежными насосами с разными характеристиками / Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов, А.В. Цыплов, М.В. Исаев // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 4. – С. 41–45.

4. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Характеристики параллельно соединенных канализационных насосов высокой производительности // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2019. – № 4(50). – С. 13–16.

5. Балышев О.А., Балышев С.О. Нелинейные динамические гидравлические цепи // Доклады РАН. – 2004. – Т. 397, № 5. – С. 606–609.

6. Giustolisi O., Berardi L., Laucelli D. Generalizing WDN Simulation Models to Variable Tank Levels // Journal of Hydroinformatics. – 2012. – No. 14. – P. 562–573.

7. Todini E., Rossman L.A. Unified Framework for Deriving Simultaneous Equation Algorithms for Water Distribution Networks // Journal of Hydraulic Engineering. – 2013. – Vol. 139, No. 5. – P. 511–526.

8. Применение метода контрольного объема для моделирования нестационарных процессов в трубопроводных системах / В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, И.Г. Зорина и др. // Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – № 4(12). – С. 34–46.

9. Христо П.Е. Оптимизация энергопотребления центробежной машины в нестационарных режимах в ограниченной области изменения переменных // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2014. – № 12. – С. 2–16.

10. Протопопов А.А., Виговский В.И. Анализ работы центробежного насоса в составе системы с изменяющимися параметрами // Политехнический молодежный журнал. – 2017. – № 11. – 6 с. – URL: <http://ptsj.ru/articles/198/198.pdf>.

11. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

12. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примаков Л.В. Обобщенные характеристики канализационных насосов высокой производительности // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78, № 10. – С. 32–36.

References

1. Merenkov, A.P., Khasilev, V.Ya. *Teoriya gidravlicheskikh tsepey* [Theory of hydraulic circuits]. Moscow: Nauka, 1985. 278 p.
2. Loginov, K.V., Myznikov, A.M., Fayzullin, R.T. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2006, vol. 18, no. 9, pp. 92–106.
3. Elin, N.N. Mizonov, V.E., Tsyplov, A.V., Isaev, M.V. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 4, pp. 41–45.
4. Velikanov, N.L., Naumov, V.A., Koryagin, S.I. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*, 2019, no. 4(50), pp. 13–16.

5. Balyshev, O.A., Balyshev, S.O. *Doklady RAN*, 2004, vol. 397, no. 5, pp. 606–609.
6. Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D. *Journal of Hydroinformatics*, 2012, no. 14, pp. 562–573.
7. Todini, E., Rossman, L.A. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, vol. 139, no. 5, pp. 511–526.
8. Volkov, V.Yu., Golibrodo, L.A., Zorina, I.G., Kudryavtsev, O.V., Krutikov, A.A., Skibin, A.P. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody*, 2016, no. 4(12), pp. 34–46.
9. Khristo, P.E. *Energoberezhenie, energetika, energoaudit*, 2014, no. 12, pp. 2–16.
10. Protopopov, A.A., Vigovskiy, V.I. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal*, 2017, no. 11, 6 p. Available at: <http://ptsj.ru/articles/198/198.pdf>.
11. Chugaev, R.R. *Gidravlika (tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti)* [Hydraulics (technical fluid mechanics)]. Moscow: Energoizdat, 1982. 672 p.
12. Velikanov, N.L., Naumov, V.A., Primak, L.V. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2017, vol. 78, no. 10, pp. 32–36.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи:

Основной текст располагается в две колонки, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **11**. Обязательно указывается УДК.

Название статьи (на русском и английском языках), *фамилии и инициалы авторов* (на русском языке и в транслитерации), название организации с указанием ведомства и полного юридического адреса (города и страны), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики (CorelDRAW) либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 10 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть только черно-белыми, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **11**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются приставные библиографические списки (на русском языке и References) и информация об авторах (место работы, должность, звание, ученая степень, контактная информация).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 4

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

Подписано в печать 13.08.2020. Выход в свет 31.08.2020. Формат 60х84 1/8.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 9,21. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

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