



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

2021 / Вып. 5

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

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В.А. Шуин, Ю.Д. Кутумов, Н.В. Кузьмина, Т.Ю. Шадрикова. Выбор параметров моделей воздушных линий для расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в сетях напряжением 6–10 кВ.....**5**

И.М. Казымов, Б.С. Компанеец. Метод определения факта и места возникновения коммерческих потерь в распределительных сетях.....**18**

В.А. Шуин, Ю.Д. Кутумов, Н.В. Кузьмина, Т.Ю. Шадрикова. Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю.....**30**

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов. Оценка влияния режимов работы электроприводов прокатного стана с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети 10 кВ....**41**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.И. Тихонов, В.Е. Мизонов, А.В. Стулов, М.С. Фадеева. Моделирование тепловых процессов с использованием электрических схем замещения в цифровых двойниках технических устройств.....**51**

А.В. Митрофанов, О.В. Сизова, Н.С. Шпейнова, В.А. Катюшин. Математическое моделирование и анализ функционирования цилиндрического пиролизного реактора с радиальным нагревом.....60

А.Е. Барочкин. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в контактных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях.....68

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

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

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



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

2021 / Issue 5

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. Antić, 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

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

V.A. Shuin, Yu.D. Kutumov, N.V. Kuzmina, T.Yu. Shadrikova. Selection of parameters of overhead lines models when calculating transient processes during earth faults in 6–10 kV networks.....**5**

I.M. Kazymov, B.S. Kompaneets. Method to determine fact and place of commercial losses in distribution networks.....**18**

V.A. Shuin, Yu.D. Kutumov, N.V. Kuzmina, T.Yu. Shadrikova. Simulation study of 6–10 kV cable lines for transient processes calculation during earth faults.....**30**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov. Assessment of influence of rolling mill FC-AR electric drive operation mode on 10 kV supply network voltage quality.....**41**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

A.I. Tikhonov, V.E. Mizonov, A.V. Stulov, M.S. Fadeeva. Modeling thermal processes using electrical equivalent circuits in digital twins of technical devices.....**51**

A.V. Mitrofanov, O.V. Sizova, N.S. Shpeynova, V.A. Katyushin. Mathematical modeling and analysis of operation of cylindric pyrolysis reactor with radial heating.....**60**

A.E. Barochkin. Matrix method to solve inverse problem of heat transfer in heat exchangers with phase transition in heat carriers.....**68**

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

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

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

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

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Владимир Александрович Шуин

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

Юрий Дмитриевич Кутумов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Наталья Владимировна Кузьмина

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова

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

Выбор параметров моделей воздушных линий для расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в сетях напряжением 6–10 кВ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Однофазные замыкания на землю являются наиболее распространенным видом повреждений в воздушных распределительных сетях напряжением 6–10 кВ. Наибольшую опасность для сети и поврежденного элемента представляют дуговые перемежающиеся ОЗЗ, сопровождающиеся интенсивными переходными процессами и, как следствие, опасными перенапряжениями и значительными бросками переходного тока в месте повреждения изоляции. Переходные процессы при ОЗЗ также оказывают значительное влияние на селективность и устойчивость функционирования устройств защиты от данного вида повреждений. В связи с этим разработка методов и средств повышения эффективности функционирования воздушных сетей 6–10 кВ при ОЗЗ и технического совершенствования устройств защиты во многих случаях связана с необходимостью расчетов переходных процессов, возникающих при пробоях изоляции фазы сети на землю. Достоверность расчетов переходных процессов при ОЗЗ в рассматриваемых сетях определяется главным образом точностью учета продольных параметров воздушных линий 6–10 кВ, прежде всего индуктивностей, которые в общем случае зависят от частоты составляющих переходного тока. В публикациях, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, включая воздушные сети 6–10 кВ, в схемах замещения и моделях ЛЭП, как правило, используются постоянные (не зависящие от частоты) значения индуктивностей. Оценка погрешностей, обусловленных применением указанного подхода к

определению параметров воздушных линий 6–10 кВ при расчетах и моделировании переходных процессов при ОЗЗ, и определение области его применения является, на наш взгляд, актуальной задачей.

Материалы и методы. Для получения частотных зависимостей индуктивностей трехфазной воздушной линии 6–10 кВ и исследования их влияния на точность расчетов переходных токов и напряжений при ОЗЗ использованы современные методы моделирования электроэнергетических систем и их элементов с применением программных комплексов COMSOL Multiphysics и PSCAD. Параметры моделей воздушной линии 6–10 кВ, разработанных в указанных программных комплексах, на частоте 50 Гц заданы в соответствии со справочными данными.

Результаты. Получены оценки погрешностей определения параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при использовании моделей ЛЭП, не учитывающих частотные зависимости индуктивностей, составляющие по амплитуде до 40–50 %. Показано, что применение частотно-независимых моделей допустимо только в тех случаях, когда параметры расчетной схемы замещения сети и положение точки ОЗЗ остаются практически постоянными, при решении задач, требующих высокой точности определения параметров переходных токов и напряжений, например дистанционного определения места замыкания на землю, необходимо использовать частотно-зависимые модели воздушных линий 6–10 кВ.

Выводы. Применение разработанных рекомендаций по определению параметров трехфазных воздушных линий 6–10 кВ позволяет повысить достоверность расчетов и избежать грубых ошибок при решении задач, связанных с исследованиями переходных процессов при ОЗЗ в сетях данного класса напряжения.

Ключевые слова: воздушные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, переходные процессы, параметры схем замещения, параметры моделей воздушных линий

Vladimir Alexandrovich Shuin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vshuin@mail.ru

Yuri Dmitrievich Kutumov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Natalia Vladimirovna Kuzmina

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Tatiana Yurievna Shadrikova

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

Selection of parameters of overhead lines models when calculating transient processes during earth faults in 6–10 kV networks

Abstract

Background. Single phase-to-ground faults are the most common type of faults in 6–10 kV overhead distribution networks. Arc intermittent single phase-to-ground fault (PSP) are the most dangerous for the network and the damaged element. They are followed by intense transient processes and, as a result, dangerous overvoltage rate and significant transient current surges at the point of insulation damage. PSP transients also have a significant effect on the selectivity and operation stability of protection devices against this type of damage. Therefore, the development of the methods and means to improve the operation efficiency of 6–10 kV overhead networks in case of PSP and technical improvement of protection devices in many cases is due to the need to calculate the transient processes that occur during insulation breakdowns of the network phase to earth. For the systems under consideration, the reliability of transient processes calculations in case of PSP is determined mainly by the accuracy of estimation of the parameters of 6–10 kV overhead lines, first of all, of inductance, which generally depends on the frequency of the transient current components. In the scientific papers devoted to the study of transient processes in case of PSP in medium voltage electrical networks, including 6–10 kV overhead networks, constant (frequency independent) values of inductance are used as a rule in the equivalent circuits and in the models of transmission lines. An urgent task is to estimate errors caused by the application of this approach to determine the parameters of 6–10 kV overhead lines during the calculations and modeling of transient processes during PSP, and cases of its application.

Materials and methods. Advanced methods of modeling of electric power systems and their elements have been applied with the use of COMSOL Multiphysics and PSCAD software to obtain the frequency dependences of the inductances of a 6–10 kV three-phase overhead line and study of their influence on the calculation accuracy of transient currents and voltages in case of PSP. The parameters of 6–10 kV overhead line models developed in the indicated software packages at a frequency of 50 Hz are set in accordance with the reference data.

Results. The authors obtain the errors estimation to determine the parameters of transient currents and voltages during PSP in 6–10 kV overhead networks when using transmission line models. The frequency dependences of inductance, which are up to 40–50 % in amplitude are not considered. The results show that application of frequency-independent models is permissible only in the cases when parameters of the calculated equivalent circuit of the network and position of PSP point remain practically constant, when solving problems that require high accuracy to determine the parameters of transient currents and voltages, for example, to determine remotely the location of a ground fault, it is necessary to use frequency-dependent models of 6–10 kV overhead lines.

Conclusions. Introduction of the developed recommendations to determine 6–10 kV three-phase overhead lines parameters allow us to increase the reliability of calculations and to avoid raw errors when solving the problems which are related to the study of transient processes in case of earth faults in the networks of the given voltage class.

Key words: 6–10 kV overhead networks, single phase-to-ground fault, transient processes, parameters of equivalent circuits, parameters of overhead lines models

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.005-017

Введение. Необходимость в расчетах переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения, включая воздушные сети 6–10 кВ, работающие с изолированной нейтралью, резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор или заземлением нейтрали через высокоомный резистор, возникает при решении следующих задач:

- определение максимальных перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ);

- определение среднеквадратичного значения тока при ДПОЗЗ для проверки проводников и изоляции поврежденной линии, ограничителей перенапряжений и других аппаратов на термическую стойкость;

- исследование влияния переходных процессов на устойчивость функционирования защит от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих установившегося режима замыкания (составляющей основной частоты 50 Гц, высших гармоник, «наложенных» токов промышленной частоты);

- разработка защит от замыканий на землю, основанных на использовании электрических величин переходного процесса;

- разработка методов дистанционного определения места замыкания на землю (ДОМЗЗ) по параметрам переходных токов и напряжений и др.

Анализ публикаций, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего

напряжения, показал, что при параметрировании расчетных схем замещения и имитационных моделей ЛЭП, как правило, применяются два подхода к определению их продольных параметров:

- 1) по справочным данным, полученным на частоте 50 Гц (например, [1–6]);

- 2) по параметрам, определенным по скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей (в каналах «фаза–фаза» и «фаза–земля») (например, [7–10]):

$$L_{1л} = L_{2л} \approx \frac{1}{V_1^2 C_{1л}}; \quad (1)$$

$$L_{0л} \approx \frac{1}{V_0^2 C_{0л}}, \quad (2)$$

где $C_{1л}$ и $C_{0л}$ – погонные емкости прямой и нулевой последовательностей ЛЭП соответственно; V_1 , V_0 – скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей.

Оба подхода основаны на применении моделей ЛЭП, параметры которых не зависят от частоты токов переходного процесса при ОЗЗ (частотно-независимых моделей). Первый из указанных подходов применяется при расчетах переходных процессов как в воздушных, так и в кабельных сетях среднего напряжения. Следует отметить также, что во многих публикациях, посвященных расчетам переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, отсутствуют какие-либо рекомендации по определению параметров схемы замещения или модели ЛЭП. Поэтому можно полагать,

что авторами указанных публикаций по умолчанию принимается, что параметры ЛЭП определяются по справочным данным, рассчитанным для частоты 50 Гц. Второй подход получил применение при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ (например [9, 10]).

Применение при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ частотно-независимых моделей с учетом того, что продольные сопротивления, прежде всего индуктивности, воздушных линий (ВЛ) зависят от частоты, приводит к погрешностям в оценке параметров (амплитуды, частоты, постоянных затухания и др.) переходных токов и напряжений. В связи с этим актуальной задачей является оценка значений указанных погрешностей и определение допустимости и области применения частотно-независимых моделей ВЛ при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ.

Методы исследования. Основными методами исследований переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения являются аналитические расчеты с использованием упрощенных математических моделей (схем замещения) и имитационное моделирование с применением специально разработанных программ и современных систем для научно-технических расчетов в области электроэнергетики и электротехники (Matlab, PSCAD, RTDS, ATPDesigner [11–14]).

При оценке погрешностей, обусловленных применением в расчетах переходных процессов при ОЗЗ упрощенных частотно-независимых моделей ВЛ 6–10 кВ, важной задачей является выбор эталонной частотно-зависимой модели ЛЭП. В качестве эталонной может быть принята частотно-зависимая модель ВЛ 6–10 кВ, полученная с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics, позволяющего с высокой точностью моделировать любые физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями [15].

Однако COMSOL Multiphysics не может эффективно использоваться для построения моделей электрических сетей, содержащих, кроме ВЛ, и другие элементы, влияющие на параметры переходных токов и напряжений. С учетом этого для исследований погрешностей, возникающих при расчетах переходных процессов

при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ с использованием моделей ВЛ, параметры которых не зависят от частоты, нами применялся программный комплекс PSCAD [12], позволяющий создавать модели электрических сетей с применением как частотно-зависимых, так и частотно-независимых моделей ЛЭП. Отметим, что частотно-зависимая модель Frequency Dependent (Phase) Model в программном комплексе PSCAD считается наиболее точной из описанных в научной литературе моделей для выполнения расчетов переходных процессов и установившихся режимов в воздушных ЛЭП. Частотно-зависимая модель ВЛ в COMSOL Multiphysics использовалась для верификации модели воздушной линии в PSCAD.

Имитационные модели в PSCAD для исследования погрешностей расчета переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ. Исследования погрешностей расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ, обусловленных применением частотно-независимых моделей ВЛ, выполнялись для воздушной сети напряжением 6 кВ, схема которой приведена на рис. 1,а.

Схемы сетей 6 кВ с частотно-зависимыми и частотно-независимыми моделями воздушных линий идентичны и включают в себя две ЛЭП (ВЛ1, ВЛ2 для анализа переходных процессов при ОЗЗ как в поврежденной, так и в неповрежденной линиях), трехфазный источник питания (систему С) с номинальным напряжением 6 кВ и емкости внешней сети. Расчетная имитационная модель сети в программном комплексе PSCAD приведена на рис. 1,б. Основные параметры исследуемой сети (суммарный емкостный ток $I_{\Sigma C}$, длины линий ВЛ1 и ВЛ2, индуктивность источника питания и др.) при проведении вычислительных экспериментов могут изменяться.

Модели воздушных линий ВЛ1 и ВЛ2 в PSCAD реализованы с помощью компонента Transmission Line, в котором, кроме конструктивных параметров, могут быть заданы зависимость индуктивностей и активных сопротивлений от частоты (частотно-зависимая модель Frequency Dependent (Phase) Model Options (рис. 2,а)) или погонные значения продольных параметров для фиксированной частоты (частотно-независимая модель Bergeron Model Options (рис. 2,б)).

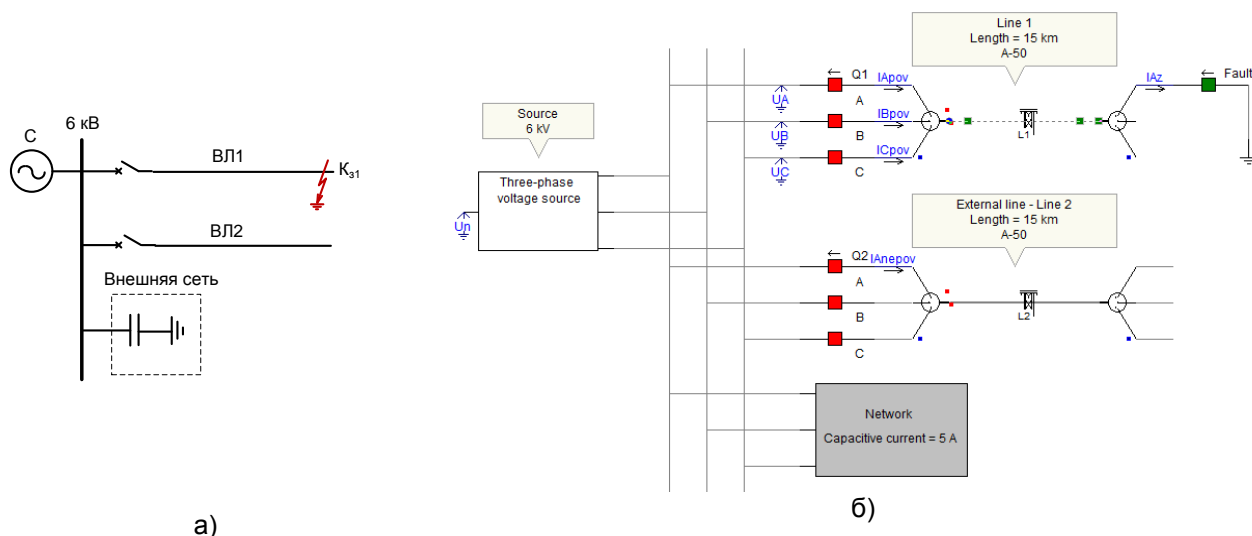


Рис. 1. Однолинейная схема электрической сети 6 кВ для исследования влияния частотной зависимости параметров воздушной линии на погрешности расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ (а) и ее имитационная модель в PSCAD (б)

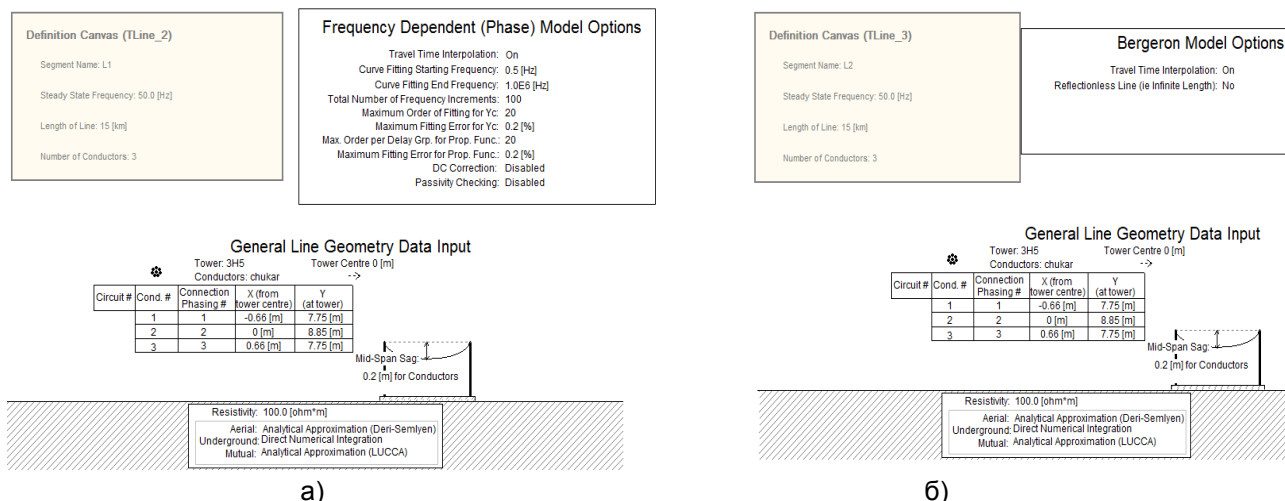


Рис. 2. Модели воздушной ЛЭП, реализуемые в PSCAD на основе компонента Transmission Line: а – окно параметров частотно-зависимой модели ВЛ Frequency Dependent (Phase); б – окно параметров частотно-независимой модели Bergeron

Параметрирование частотно-зависимой и частотно-независимых моделей ВЛ сети 6 кВ. Компонент Transmission Line программного комплекса PSCAD позволяет создавать частотно-зависимую модель ВЛ Frequency Dependent (Phase) Model Options только с проводниками кругового сечения. При создании такой модели задаются данные, включающие конструктивные параметры промежуточной опоры ЛЭП, сечение, материал, конструктивные параметры и провис проводов, электрические характеристики грунта, рабочую частоту ЛЭП и др. (рис. 2,а).

В распределительных сетях напряжением 6–10 кВ наиболее широкое применение получили алюминиевые провода (среднее

сечение проводов ВЛ равно $\sim 50 \text{ мм}^2$). С учетом этого принято, что в схеме сети 6 кВ (рис. 2,а) ВЛ1 и ВЛ2 выполнены проводом марки А-50/9 на промежуточных опорах типа П10-1. Основные параметры ВЛ1 и ВЛ2, используемые при создании в PSCAD, частотно-зависимой и частотно-независимой моделей, приведены в таблице.

В моделях, основанных на использовании второго из указанных выше подходов к параметрированию расчетных схем замещения и имитационных моделей ВЛ, используются так называемые справочные значения индуктивностей и активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей, определенных для частоты $f = 50 \text{ Гц}$. Поперечные параметры ВЛ – ем-

кости прямой и нулевой последовательно-стей – от частоты не зависят.

Основные параметры ВЛ1 и ВЛ2

Марка провода	A-50/9
сечение провода F , мм ²	50
радиус провода r_n , мм	4,5
число проволок в проводе	3
радиус проволоки r , мм	1,5
удельное активное сопротивление провода ρ , Ом·м/мм ²	0,0315
стрела провиса проводов, м	0,2
Тип промежуточной опоры	П10-1
Расстояния между фазными проводами:	
– D_{AB} , мм	1300
– D_{BC} , мм	1300
– D_{AC} , мм	1320
Расстояния между фазными проводами и землей:	
– D_A , мм	7750
– D_B , мм	8850
– D_C , мм	750
Удельное сопротивление земли (грунта) ρ_3 , Ом·м	100
Установившаяся (рабочая) частота f , Гц	50

Справочные продольные параметры для воздушных ЛЭП на рабочей частоте определяются расчетным способом по методике J.R. Carson [16, 17]. Для трехфазной ВЛ без тросов погонные значения сопротивлений прямой и нулевой последовательностей могут быть определены по следующим выражениям [17]:

$$Z_{1л} = R_{1л} + jX_{1л} = r_n + j(0,145 \frac{D_{cp}}{\rho_{э.л}} + 2\pi f \frac{\mu_0 \mu}{8\pi} 10^3), \quad (3)$$

где r_n – активное сопротивление провода, Ом/км; D_{cp} – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз А, В и С, м; $\rho_{э.л}$ – эквивалентный радиус провода, м;

– сопротивление нулевой последовательности

$$Z_{0л} = R_{0л} + jX_{0л} = r_n + 3r_3 + j(0,435 \frac{D_3}{\rho_{cp}} + 2\pi f \frac{\mu_0 \mu}{8\pi} 10^3), \quad (4)$$

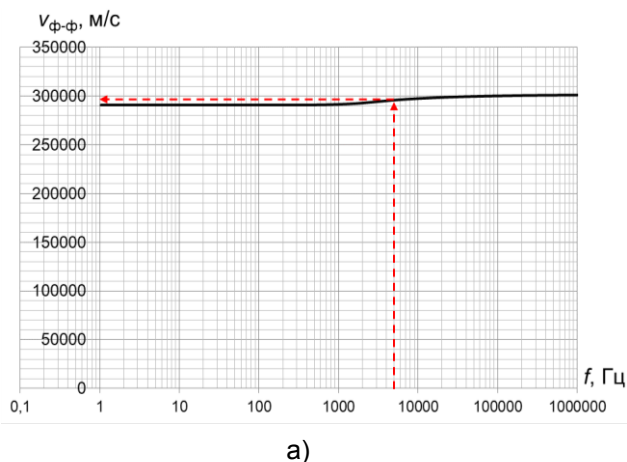
где r_3 – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле, Ом/км; ρ_{cp} – средний геометрический радиус системы трех проводов линии, м; D_3 – эквивалентная глубина расположения обратного провода в земле, м.

Сравнение значений $R_{1л}$, $X_{1л}$, $R_{0л}$, $X_{0л}$, рассчитанных по (3) и (4), со значениями указанных параметров, определенных при $f = 50$ Гц по частотным характеристикам индуктивных и активных сопротивлений частотно-зависимой модели ВЛ в PSCAD, показало практически точное их совпадение (погрешности не более 1–2 %). Таким образом, для параметрирования частотно-независимой модели Bergeron с использованием справочных значений продольных параметров ВЛ в программном комплексе PSCAD достаточно принять установившуюся (рабочую) частоту f равной 50 Гц, как и для частотно-зависимой модели. В остальных случаях конкретные значения справочных параметров ЛЭП на частоте 50 Гц $R_{1л}$, $X_{1л}$, $R_{0л}$, $X_{0л}$ (например, при расчетах на основе схем замещения сети, параметрировании имитационных моделей ЛЭП в Matlab и др.) определяются по (3) и (4).

Более сложной задачей является определение фиксированного значения частоты при параметрировании в PSCAD частотно-независимой модели Bergeron, параметры которой определяются по скорости распространения электромагнитных волн в ЛЭП по (1) и (2). В отличие от кабельных линий среднего напряжения, для которых скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей примерно одинаковы и обычно принимаются равными $V_1 \approx V_0 = 150\text{--}160$ м/мкс независимо от спектра свободных составляющих переходных токов и напряжений при ОЗЗ [7, 9, 10], для ВЛ характерно существенное различие зависимости указанных скоростей от частоты (рис. 3).

Для определения скоростей распространения электромагнитных волн V_1 и V_0 на основе зависимостей рис. 3,а,б необходимо оценить «верхнюю» частоту спектра свободных составляющих переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ. В переходных токах и напряжениях при ОЗЗ условно выделяют две основные составляющие, различающиеся по частоте колебаний [4, 9, 10]. Первая из них связана с разрядом емкости поврежденной фазы и перезарядом междофазных емкостей и называется разрядной, вторая связана с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз через индуктивность источника питания и называется зарядной. Частота разрядных колебаний при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ зависит в основ-

ном от суммарного емкостного тока сети I_{Σ} и удаленности места повреждения от шин источника питания и может изменяться от единиц килогерц до 5 и более килогерц. Ча-



стота зарядных колебаний зависит также от индуктивности источника питания и может изменяться от сотен герц до 1,5–2 кГц.

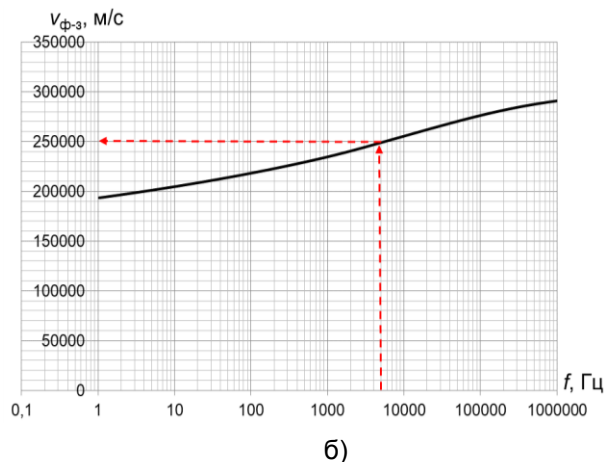


Рис. 3. Зависимости скорости распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей ВЛ 6–10 кВ от частоты: а – канал прямой последовательности («фаза–фаза»); б – канал нулевой последовательности («фаза–земля»)

Анализ спектрограмм переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при различных значениях основных параметров (суммарного емкостного тока сети $I_{\Sigma} = 1\text{--}10$ А, удаленности места ОЗЗ от шин источника питания $l_3 = 0,5\text{--}30$ км, индуктивности источника питания) показал, что 90 % и более энергии броска переходного тока сосредоточено в диапазоне частот до ~5 кГц (рис. 4).

Составляющие более высокой частоты быстро затухают из-за быстрого увеличения активного сопротивления земли r_3 с ростом частоты переходного тока ОЗЗ [17]

$$r_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

и практически не оказывают влияния на форму и параметры броска переходного тока. С учетом изложенного «верхнюю» частоту спектра свободных составляющих переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при определении скорости распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей ВЛ можно принять равной ~5 кГц. При $f = 5$ кГц $V_1 \approx 295$ м/мкс (рис. 3,а) и $V_0 \approx 250$ м/мкс (рис. 3,б).

Таким образом, при применении для расчетов переходных процессов при ОЗЗ программного комплекса PSCAD для параметрирования частотно-независимой модели Bergeron с использованием значений продольных параметров ВЛ достаточно принять установившуюся частоту $f = 5$ кГц.

В случаях, когда необходимы конкретные значения индуктивностей ВЛ (например, при расчетах на основе схем замещения сети, параметрировании имитационных моделей ЛЭП в Matlab и др.), $L_{1л}$ и $L_{0л}$ определяют по (1) и (2) при $V_1 \approx 295$ м/мкс и $V_0 \approx 250$ м/мкс.

Отметим также, что значения индуктивностей $L_{1л}$ и $L_{0л}$, определенных по (1) и (2) при $V_1 \approx 295$ м/мкс и $V_0 \approx 250$ м/мкс, достаточно точно совпадают (погрешности не более ~2–3 %) со значениями указанных параметров, определенных при $f = 5$ кГц по частотным характеристикам модели ВЛ Frequency Dependent (Phase) Model Options в PSCAD.

Частотные характеристики моделей ВЛ 6–10 кВ. Так как параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ определяются параметрами схем замещения прямой и нулевой последовательностей, частотные характеристики моделей ВЛ удобно представить в виде зависимостей индуктивностей прямой и нулевой последовательностей от частоты. На рис. 5 приведены частотные характеристики ВЛ 6 кВ, выполненной проводом марки А-50/9 на промежуточных опорах типа П10-1, для частотно-зависимых моделей линии в PSCAD и COMSOL Multiphysics и для частотно-независимых моделей с параметрами, рассчитанными по справочным данным и по уравнениям (1) и (2).

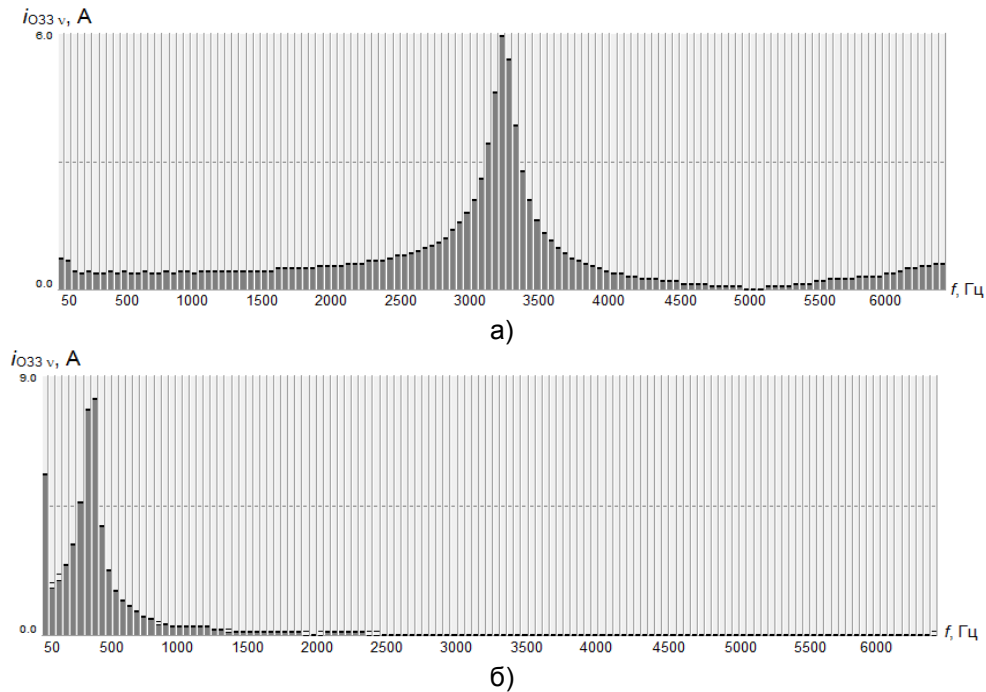


Рис. 4. Спектрограммы бросков переходного тока $i_{O33\ v}$ в месте ОЗЗ в сети 6 кВ: а – $I_{c\Sigma} = 1\text{ A}$, $l_3 = 0,5\text{ км}$; б – $I_{c\Sigma} = 5\text{ A}$, $l_3 = 15\text{ км}$

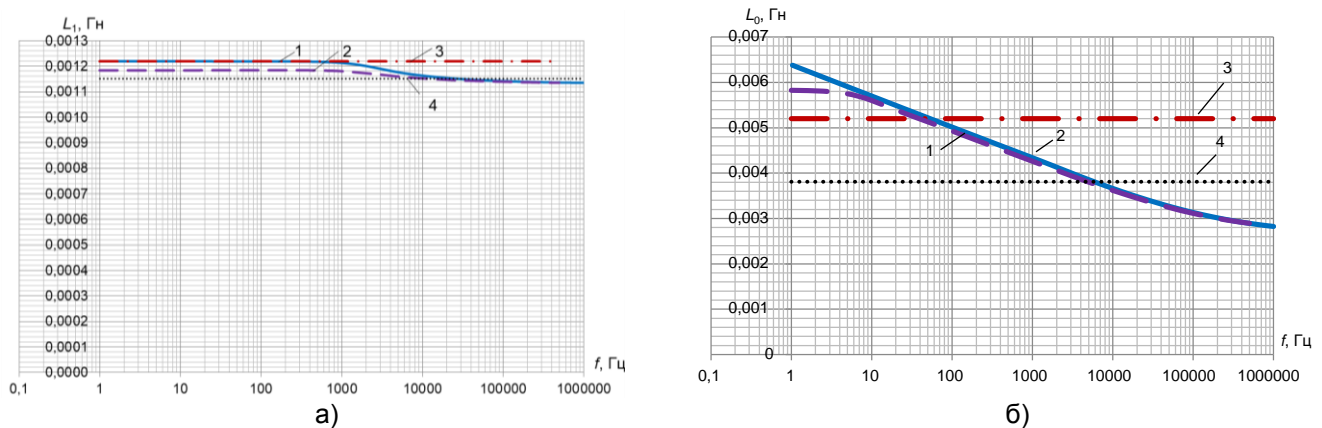


Рис. 5. Частотные характеристики прямой (а) и нулевой (б) последовательностей различных моделей ВЛ 6 кВ: 1 – модель в PSCAD; 2 – модель в COMSOL Multiphysics; 3 – частотно-независимая модель с параметрами на основе справочных данных; 4 – частотно-независимая модель с параметрами, рассчитанными по уравнениям (1) и (2)

Анализ полученных зависимостей (рис. 5,а,б) показывает, что в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц МГц отклонения частотных характеристик модели ВЛ в PSCAD (зависимости 1) от характеристик модели в COMSOL Multiphysics (зависимости 2), принятой за эталонную, для индуктивностей прямой последовательности не превышают ~3,5 %, для индуктивностей нулевой последовательности – менее 2 %. При частотах более 10 кГц отклонения частотных характеристики модели ВЛ в PSCAD от соответствующих характеристик модели в COMSOL Multiphysics уменьшаются практически до нуля. Таким образом,

модель в PSCAD также можно рассматривать как эталонную.

Анализ полученных зависимостей также показывает, что при одинаковых параметрах источника питания и внешней сети (рис. 2,а) основной причиной возникновения погрешностей расчетов переходных процессов при ОЗЗ при использовании частотно-независимых моделей ВЛ являются, прежде всего, отклонения их частотных характеристик нулевой последовательности (рис. 5,б, зависимости 3 и 4) от соответствующих характеристик эталонных частотно-зависимых моделей ВЛ (рис. 5,б, зависимости 1 и 2). Величины указанных отклонений частотных характеристик, а

следовательно, и величины погрешностей расчета зависят от спектра частот переходных токов и напряжений. При преобладании в спектре свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ относительно низких частот (от сотен герц до ~1 кГц) более точные результаты расчета позволяет обеспечить модель 3 с параметрами на основе справочных данных. В области более высоких частот (от 1 кГц и выше) – модель 4 с параметрами, определенными по скорости распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей ВЛ.

Методика проведения вычислительных экспериментов на имитационных моделях. Для проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния частотной зависимости индуктивностей ВЛ на погрешности расчетов переходных процессов при ОЗЗ использовались одновременно три имитационные модели воздушной сети 6 кВ (см. рис. 2,б) в PSCAD, различающиеся моделями воздушных линий ВЛ1 и ВЛ2:

– модель 1 (эталонная) с частотно-зависимыми моделями ВЛ1 и ВЛ2 (Frequency Dependent (Phase) Model);

– модель 2 с частотно-независимыми моделями ВЛ1 и ВЛ2 (Bergeron Model), продольные параметры которых определены по справочным данным для частоты 50 Гц;

– модель 3 с частотно-независимыми моделями ВЛ1 и ВЛ2 (Bergeron Model), индуктивности прямой и нулевой последовательностей которых определены по скоро-

сти распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей линий.

Вычислительные эксперименты на моделях сети включали:

– имитацию однократного пробоя изоляции в конце ВЛ1 (см. рис. 2,а, т. K_{31}), переходящего в устойчивое ОЗЗ;

– имитацию ДПОЗЗ в конце ВЛ1 (см. рис. 2,а, т. K_{31}).

При однократном пробое изоляции измерялись и оценивались параметры основной составляющей свободных колебаний переходного тока ОЗЗ и переходного напряжения на поврежденной фазе (амплитуда, длительность первой полу волны, постоянная затухания). При ДПОЗЗ оценивались максимальные перенапряжения на неповрежденных фазах сети и среднеквадратичное значение тока в месте повреждения. Как уже отмечалось выше, при проведении вычислительных экспериментов параметры сети 6 кВ варьировались в следующих пределах: суммарный емкостный ток сети $I_{\Sigma} = 1\text{--}10\text{ А}$; расстояние от шин источника питания до места ОЗЗ $l_3 = 0,5\text{--}30\text{ км}$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов. Осциллограммы на рис. 6 иллюстрируют погрешности расчетов параметров броска переходного тока в месте ОЗЗ и напряжения на поврежденной фазе при пробое изоляции, переходящем в устойчивое замыкание, и влияние на них расстояния l_3 до места повреждения.

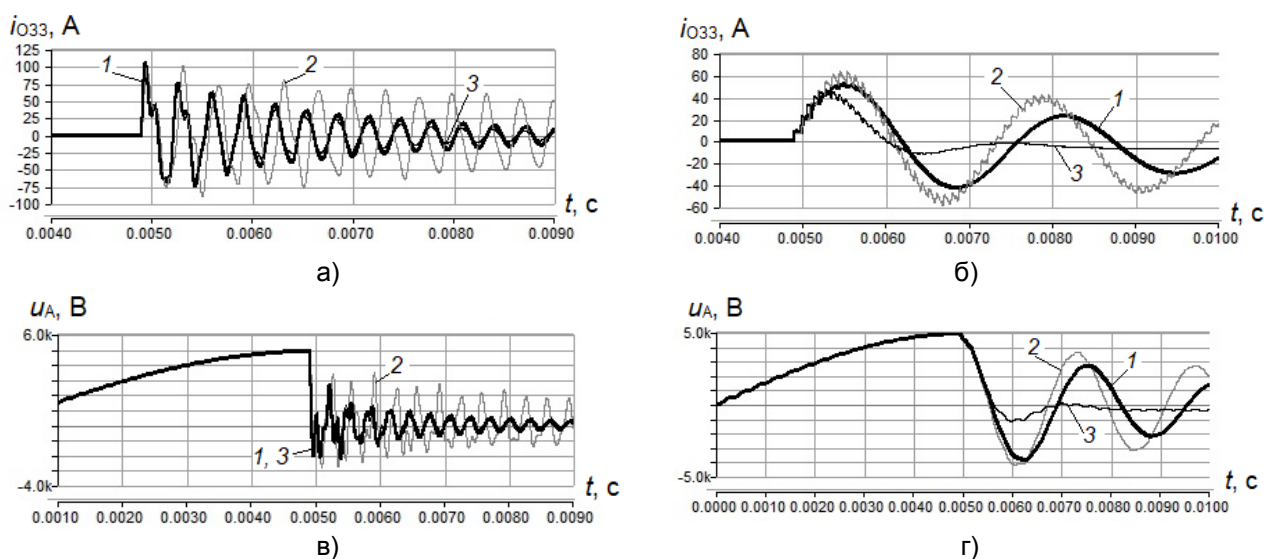


Рис. 6. Осциллограммы переходного тока в месте ОЗЗ (а, б) и напряжения на поврежденной фазе (в, г) при пробое изоляции, переходящем в устойчивое замыкание, в сети 6 кВ: а, в – $I_{\Sigma} = 1\text{ А}$, $l_3 = 0,5\text{ км}$; б, г – $I_{\Sigma} = 5\text{ А}$, $l_3 = 15\text{ км}$; а, в – $l_3 = 0,5\text{ км}$; б, г – $l_3 = 15\text{ км}$; 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

Анализ осциллограмм (рис. 6,а,в), полученных в сети с $I_{\Sigma} = 1$ А при $l_3 = 0,5$ км, показывает, что модель 3 (с параметрами ВЛ, определенными по скорости распространения электромагнитных волн прямой и нулевой последовательностей) дает результаты, практически точно совпадающие с результатами эталонной частотно-зависимой модели 1, в то время как для модели 2 (с параметрами ВЛ, определенными по паспортным данным) погрешность по частоте основной составляющей переходного тока и напряжения имеет величину $\sim 15\%$, а амплитудная погрешность для первых полуволн переходного тока и напряжения составляет $\sim 15\text{--}20\%$ и быстро возрастает с развитием переходного процесса. При увеличении I_{Σ} и (или) l_3 (рис. 6,б,г) частотная и особенно амплитудная погрешности модели 3 резко возрастают и превышают аналогичные погрешности модели 2, при том что частотные погрешности последней составляют $\sim 15\text{--}20\%$, а амплитудные достигают значений до $\sim 40\text{--}50\%$.

Указанные оценки погрешностей частотно-независимых моделей 2 и 3 и зависимость точности расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в воздушных сетях 6–10 кВ от значений I_{Σ} и l_3

иллюстрируют осциллограммы ДПОЗЗ, приведенные на рис. 7, 8.

Рассмотренные особенности поведения моделей сети 2 и 3, основанных на использовании частотно-независимых моделей ВЛ, можно объяснить следующим. При близких к шинам источника питания замыканиях и (или) небольших значениях суммарного тока сети I_{Σ} в спектре переходного тока ОЗЗ преобладают высокочастотные составляющие (рис. 4, а), поэтому модель 3, продольные параметры ВЛ которой примерно соответствуют данному диапазону частот, обеспечивают более высокую точность расчетов переходного процесса.

При достаточно больших расстояниях от шин до места ОЗЗ и (или) больших значениях I_{Σ} в спектре переходного тока ОЗЗ преобладают низкочастотные и среднечастотные составляющие (рис. 4,б), к которым более точно адаптирована модель 2. С учетом этого частотно-независимую модель ВЛ, параметры которой определены на основе паспортных данных для $f = 50$ Гц, можно назвать низкочастотной моделью, а модель ВЛ, параметры которой выбраны по скорости распространения электромагнитных волн в линии, т.е. для более высоких частот, – соответственно, высокочастотной.

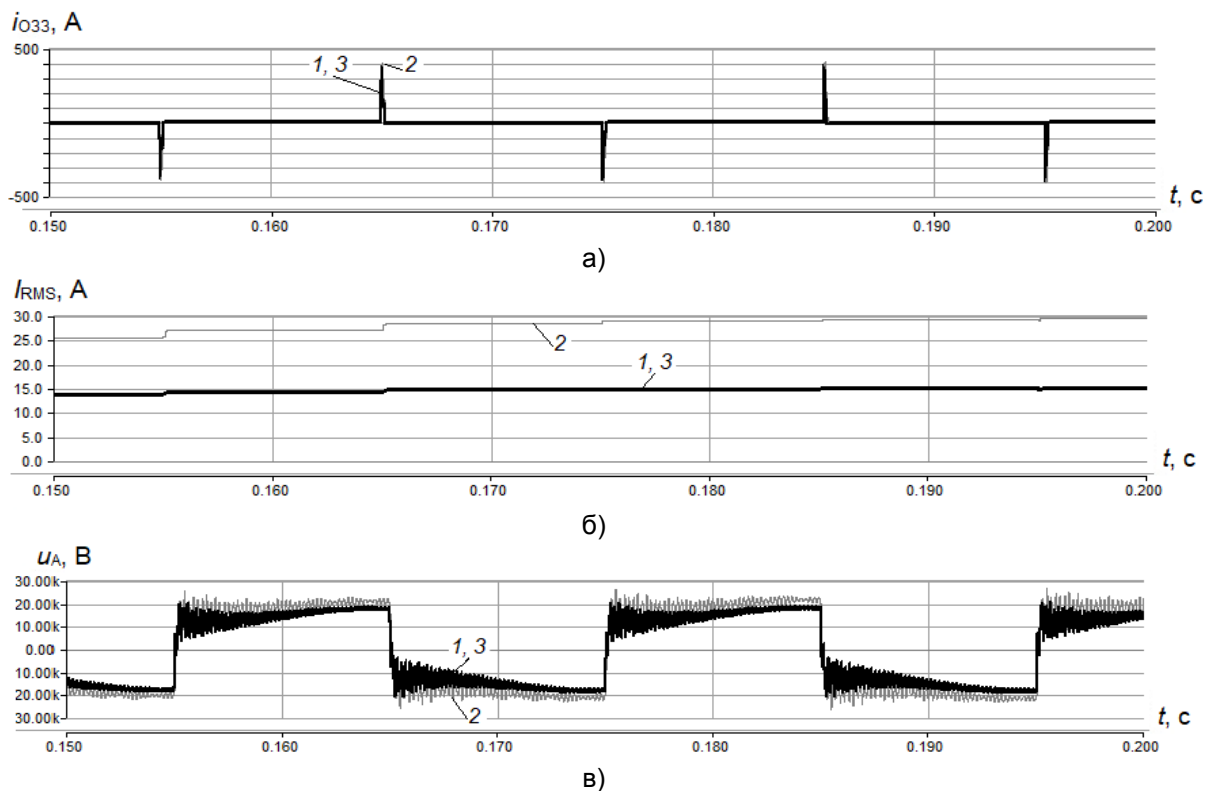


Рис. 7. Осциллограммы переходного тока в месте повреждения (а), его среднеквадратичного значения (б) и напряжения на неповрежденной фазе (в) при ДПОЗЗ в сети 6 кВ с $I_{\Sigma} = 1$ А при $l_3 = 0,5$ км: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

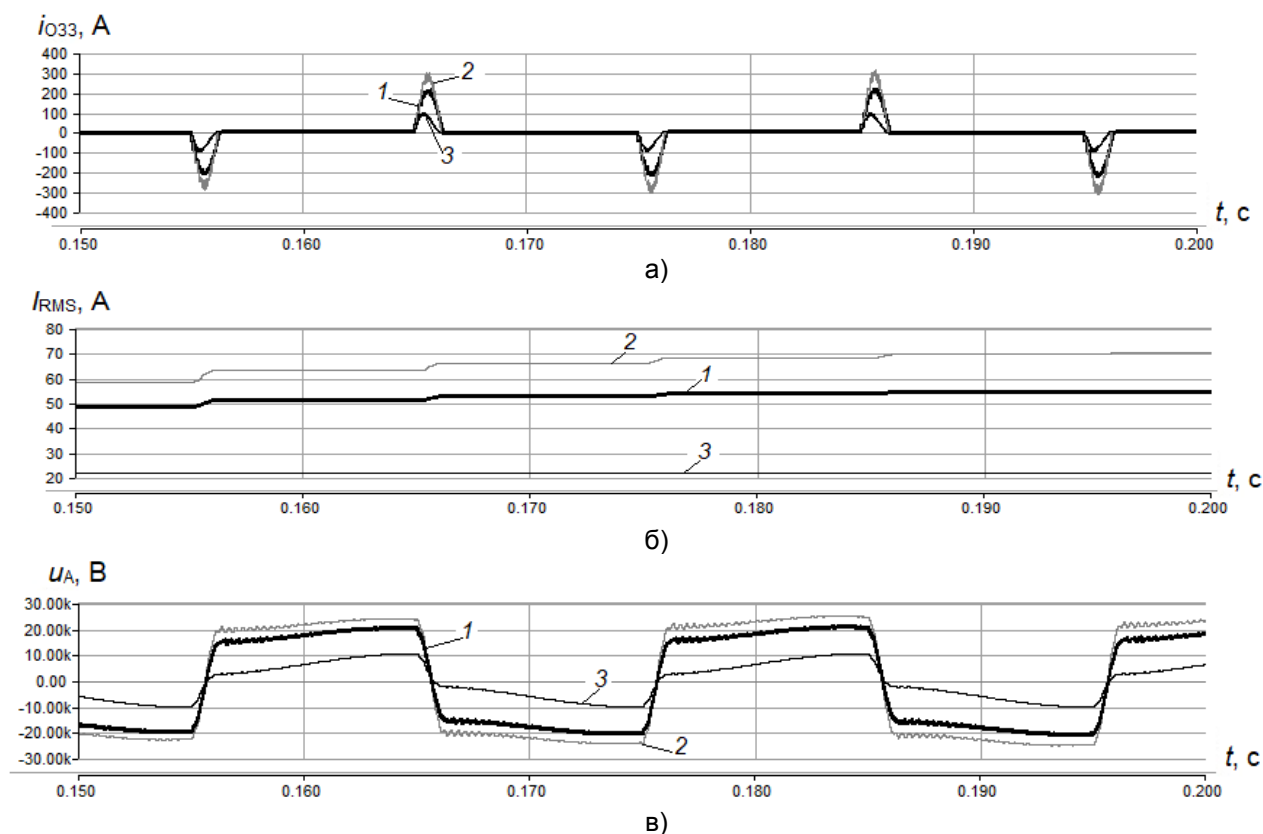


Рис. 8. Осциллограммы переходного тока в месте повреждения (а), его среднеквадратичного значения (б) и напряжения на неповрежденной фазе (в) при ДПОЗЗ в сети 6 кВ с $I_{O33} = 5$ А при $l_3 = 15$ км: 1, 2, 3 – то же, что и на рис. 7

Отметим также, что влияние на точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ могут оказывать и другие параметры сети, влияющие на частотный спектр тока повреждения, например индуктивность источника питания и переходное сопротивление в месте повреждения. Из перечисленных выше факторов наиболее существенным является расстояние от шин источника питания до места ОЗЗ.

Таким образом, точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при применении как низкочастотной, так и высокочастотной моделей ВЛ существенно зависит от положения места повреждения в сети. Следовательно, ни одна из частотно-независимых моделей ВЛ в общем случае не может обеспечить приемлемую точность расчетов переходного процесса при изменениях положения в сети места ОЗЗ. Поэтому их применение допустимо только в тех случаях, когда параметры расчетной схемы замещения или имитационной модели сети, а также положение расчетной точки ОЗЗ остаются неизменными. Такие условия имеют место, например, при оценке максимальных перенапряжений и

максимальных среднеквадратичных значений тока ОЗЗ при дуговых замыканиях, когда рассматривается повреждение на шинах источника питания.

Выводы. На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы.

1. Погрешности расчетов параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при применении в расчетных схемах замещения или имитационных моделях сети частотно-независимых моделей воздушных линий существенно зависят от положения места замыкания в сети.

2. Погрешности, указанные в п. 1, могут достигать значений 15–20 % (погрешность по частоте тока переходных токов и напряжений) и 40–50 % и более (погрешность по амплитуде).

3. С учетом п. 1 применение частотно-независимых моделей допустимо только в тех случаях, когда параметры расчетной схемы замещения или имитационной модели сети, а также положение расчетной точки ОЗЗ остаются постоянными или изменяются в небольшом диапазоне.

4. Высокую точность расчетов параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ, необходимую при решении задач, связанных с разработкой защит от данного вида повреждений на основе переходных процессов и методов ДОМЗЗ по параметрам переходного процесса, позволяет обеспечить только применение частотно-зависимых моделей ВЛ.

Список литературы

1. **Сирота И.М.** Переходные процессы при замыканиях на землю в компенсированной сети при замыкании фазы на землю // Вопросы устойчивости и автоматики энергетических систем. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – С. 55–76.
2. **Сирота И.М., Масляник В.В.** Свободные емкостные токи замыкания на землю в сетях малыми токами замыкания на землю // Электричество. – 1977. – № 3. – С. 38–43.
3. **Шуляк В.Г.** Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю // Известия вузов. Энергетика. – 1969. – № 1. – С. 1–6.
4. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
5. **Дударев Л.Е., Зубков В.В.** Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6–35 кВ и использование их для средств релейной защиты // Электрические станции. – 1978. – № 6. – С. 68–71.
6. **Сафонов Д.Г.** Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 98–102.
7. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения линии электропередачи импульсными методами. – М.: Энергия, 1968. – 215 с.
8. **Шуин В.А.** Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество. – 1983. – № 12. – С. 4–9.
9. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.
10. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
11. **Дьяконов В.П., Пеньков А.А.** MATLAB и SIMULINK в электроэнергетике. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.

12. **Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC** (Программный комплекс для моделирования энергосистем PSCAD/EMTDC) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/> [Дата обращения 13.07.21].

13. **Real-Time Digital Simulator (RTDS)** (Программно-технический комплекс цифрового моделирования в реальном масштабе времени) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/> [Дата обращения 13.07.21].

14. **ATPDesigner.** Design and Simulation of Electrical Power Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html [Дата обращения 13.07.21].

15. **COMSOL** Multiphysics Reference Manual. Справочное руководство COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf [Дата обращения 13.07.2021].

16. **Carson J.R.** Wave Propagation in overhead wires with Ground Return // Bell System Tech. Journal. – 1926, Oct. – Vol. V, no. 4. – P. 539–554.

17. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

18. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. – 1917. – P. 47–48.

References

1. Sirota, I.M. Perekhodnye protsessy pri zamykaniyakh na zemlyu v kompensirovannoy seti pri zamykanii fazy na zemlyu [Earth fault transients in a compensated network with a phase-to-ground fault]. *Voprosy ustoychivosti i avtomatiki energeticheskikh sistem* [Issues of stability and automation of power systems]. Kiev: AN USSR, 1959, pp. 55–76.
2. Sirota, I.M., Maslyanik, V.V. Svobodnye emkostnye toki zamykaniya na zemlyu v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu [Free capacitive earth fault currents in networks with low earth fault currents]. *Elektrichestvo*, 1977, no. 3, pp. 38–43.
3. Shulyak, V.G. Perekhodnye protsessy v setyakh s izolirovannoy neytral'yu pri zamykanii na zemlyu [Transient processes in networks with isolated neutral in case of earth fault]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1969, no. 1, pp. 1–6.
4. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

5. Dudarev, L.E., Zubkov, V.V. *Nekotorye osobennosti perekhodnykh protsessov pri zamykanii fazy na zemlyu v setyakh 6–35 kV i ispol'zovanie ikh dlya sredstv releynoy zashchity* [Some features of transient processes during phase-to-earth faults in 6–35 kV networks and their use for relay protection]. *Elektricheskie stantsii*, 1978, no. 6, pp. 68–71.

6. Safonov, D.G. *Imitatsionnoe modelirovanie funktsionirovaniya raspredelitel'noy seti s dugogasyashchim reaktorom* [Simulation modeling of the functioning of a distribution network with an arc suppression reactor]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2018, no. 6(162), pp. 98–102.

7. Shalyt, G.M. *Opreделение mest povrezhdeniya linii elektroperedachi impul'snymi metodami* [Determination of places of damage of a power line by impulse methods]. Moscow: Energiya, 1968. 215 p.

8. Shuin, V.A. *Vliyanie razryada emkosti povrezhdennoy fazy na perekhodnyy protsess pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 3–10 kV* [Influence of the capacitance discharge of the damaged phase on the transient process during earth faults in 3–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1983, no. 12, pp. 4–9.

9. Shuin, V.A. *Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV* [Initial phase relationships of electrical values of transient process in case of earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.

10. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh*

6–10 kV [Protection against earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: NTF Energoprogress, Energetik, 2001. 104 p.

11. D'yakov, V.P., Pen'kov, A.A. *MATLAB i SIMULINK v elektroenergetike* [MATLAB and SIMULINK in electrical engineering]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 816 p.

12. *Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC*. Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>.

13. *Real-Time Digital Simulator (RTDS)*. Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>.

14. *ATPDesigner. Design and Simulation of Electrical Power Networks*. Available at: http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html.

15. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. Available at: https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf.

16. Carson, J.R. Wave Propagation in overhead wires with Ground Return. *Bell System Tech. Journal*, 1926, Oct, vol. V, no. 4, pp. 539–554.

17. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vypusk 11. Raschety tokov korotkogo zamykaniya dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110–750 kV* [Relay protection guidelines. Issue 11. Calculations of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110–750 kV networks]. Moscow: Energiya, 1979. 152 p.

18. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, pp. 47–48.

УДК 621.31

Иван Максимович Казымов

ФГБОУВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», аспирант кафедры электрификации производства и быта, Россия, Барнаул, e-mail: bahek1995@mail.ru

Борис Сергеевич Компанец

ФГБОУВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации производства и быта, Россия, Барнаул, e-mail: kompbs@mail.ru

Метод определения факта и места возникновения коммерческих потерь в распределительных сетях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Совершенствование методов регистрации возникновения коммерческих потерь в распределительных электрических сетях, а в особенности в сетях низкого напряжения, на сегодняшний день является одной из важнейших задач, стоящих перед энергоснабжающими организациями. Существуют определенные трудности в корректной фиксации факта возникновения таких потерь в сети, заключающиеся в объективной невозможности с требуемой точностью к получаемым результатам производить анализ состояния сетей на основании данных, полученных с различных точек указанной сети. В связи с этим в настоящее время на практике не разработаны методы удаленного выявления факта и определения места возникновения коммерческих потерь в распределительных сетях, которые могли бы работать в режиме интеграции с автоматизированной информационно-измерительной системой коммерческого учета электроэнергии. Для решения указанной проблемы необходима разработка метода, позволяющего с достаточной для практических целей точностью устанавливать объем коммерческих потерь в сети и определять место их возникновения.

Методы и материалы. В процессе исследования использованы методы моделирования электрических сетей и происходящих в них процессов с допущением об отсутствии протекания в сети емкостных токов утечки на землю и полном соответствии параметров линии их расчетным (паспортным) значениям, а также базовые законы электротехники.

Результаты. Предложен уникальный метод по установлению факта и определению места возникновения коммерческих потерь в распределительных сетях на основании анализа данных, получаемых с приборов учета, построенный, в отличие от прототипов, на базовых законах электротехники и позволяющий, в отличие от прототипов, получать достоверные, арифметически строгие результаты без использования нечеткой логики. Теоретически обоснована и показана эффективность предлагаемых решений и возможность их применения на практике. На примере выполнен расчет для определения места возникновения коммерческих потерь в сети.

Выводы. Предложенный метод определения факта и места возникновения коммерческих потерь в распределительных сетях низкого и среднего уровня напряжений обеспечивает решение проблемы, связанной с невозможностью эффективно выявлять точки возникновения коммерческих потерь в распределительных сетях. Достоверность получаемых результатов подтверждается математической строгостью метода и алгоритмизированностью порядка анализа распределительной сети.

Ключевые слова: коммерческие потери в распределительных сетях, неучтенно потребляемая электроэнергия, потери электроэнергии, автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии, небаланс электроэнергии

Ivan Maksimovich Kazymov

Altai State Technical University, Postgraduate student of Electrification of Production and Household Department, Russia, Barnaul, e-mail: bahek1995@mail.ru

Boris Sergeevich Kompaneets

Altai State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrification of Production and Household Department, Russia, Barnaul, e-mail: kompbs@mail.ru

Method to determine fact and place of commercial losses in distribution networks

Abstract

Background. The improvement of methods to register the commercial losses in electrical distribution networks, and especially in low voltage networks, is one of the most important tasks for power supply providers. It is rather difficult to correctly register the fact of occurrence of such losses in the network. It is objectively impossible to analyze the state of the networks based on data obtained from various points of the specified network with the required accuracy. In this regard, at present no methods have been developed for remote detection of the fact and determination of the place of commercial losses in distribution networks, that could work in the mode of integration with automated information-measuring system of fiscal electricity metering. To solve this problem a method is to be developed that allows us to establish accurately for practical purposes the volume of commercial losses in the network and determine the place of their occurrence.

Methods and materials. During the research, methods of electric power networks modeling have been used. The assumption has been made about no flow of capacitive leakage currents to ground in the network, about full compliance of the line parameters with their calculated (nominal) values, as well as the basic laws of electrical engineering science.

Results. A unique method is proposed to determine the fact and the place of commercial losses in distribution networks. In contrast to the prototypes, it is based on the analysis of data obtained from metering devices, based on the key laws of electrical engineering and it allows us to get reliable arithmetically rigorous results without using fuzzy logic. The authors have proved theoretically and practically the effectiveness of the proposed solutions, and the possibility of their application. A calculation has been made to determine the place of commercial losses in the network using an example.

Conclusions. The proposed method to determine the fact and place of commercial losses in distribution networks of low and medium voltage levels solves the problem of inability to effectively identify the points of occurrence of commercial losses in distribution networks. The reliability of the results obtained is confirmed by mathematical rigor of the method and algorithmic nature of the procedure for analyzing the distribution network.

Key words: commercial losses in distribution networks, unaccounted electric power consumption, electric power losses, automated information-measuring system of fiscal electricity metering, imbalance of electric power

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.018-029

Введение. На сегодняшний день методы и способы определения факта наличия в сети значительных коммерческих потерь и выявления их места не отвечают требованиям времени и не обеспечивают необходимого уровня точности, своевременности, системности и, что самое главное, эффективности. Этот вопрос подробно освещен в [1]. Широко используемые сейчас меры по выявлению неучтенного потребления электроэнергии – это обходы подозрительных сетей сотрудниками электросетевых компаний и анализ приборов учета в лаборатории и на территории потребителей, в том числе с использованием переносных рентгенотелевизионных установок. Результативность подобных действий является крайне низкоэффективной с точки зрения расходования временных и финансовых ресурсов. Более подробный анализ современных способов выявления коммерческих потерь выполнен в [2].

Предлагаемые решения для удаленного выявления и анализа величины потерь в сети используют излишне сложные алгоритмы, построенные в основном на базе нечеткой логики, и требуют большого количества информации в качестве исходных данных [3–8]. Предложения по более оптимальным способам построения системы анализа величины потерь в сети представлены в [9].

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев высоким уровнем коммерческих потерь электроэнергии характеризуются сельские электрические сети низкого напряжения, что объясняется целым рядом различных факторов. Например, тот факт, что сельские сети низкого напряжения преимущественно выполняются воздушными линиями электропередач с неизолированными проводами, говорит о наличии возможности для самовольного неучтенного технологического присоединения к сети со

стороны физических или юридических лиц без значительных временных и трудовых затрат. Кроме того, совершению такого подключения способствует также и то, что рассматриваемые сети имеют в своем составе протяженные участки и в общем являются слабозащищенными от преднамеренного вмешательства в их работу.

Борьба с коммерческими потерями (потребленная, но неоплаченная электроэнергия) в сельских распределительных сетях является основным направлением работы электроснабжающих организаций во всем мире [12, 3], и в России в частности, и имеет целью повышение эффективности и рентабельности электросетевого комплекса. Например, по статистике, предоставляемой различными компаниями Алтайского края, доля коммерческих потерь в общих потерях составляет до 60 %.

Самовольное технологическое подключение к сети является одним из факторов риска нарушения электроснабжения сельских электрических сетей, ввиду того что подобного рода подключения в основной массе выполняются без соблюдения утвержденных в этой области правил и норм. Это повышает риск возникновения нарушений работы сети, а также может быть причиной аварии или ухудшения показателей качества электроэнергии.

Наличие множества точек неучтенного потребления электрической энергии, осуществляемого либо посредством самовольного присоединения к сети, либо при помощи воздействия на прибор учета, в сельских сетях низкого напряжения является одной из причин высокого уровня коммерческих потерь в них. Наличие в сети безучетного и бездоговорного потребления больших объемов электроэнергии влечет повышение общих потерь и снижение рентабельности работы сети. Так как рассматриваемые потери относятся к коммерческим потерям, они могут быть снижены за счет проведения мероприятий, условно разделяемых на два типа:

1) мероприятия по снижению доступности самовольного технологического присоединения и/или воздействия на прибор учета – чаще всего технические меры, связанные с реконструкцией и модернизацией сетей;

2) мероприятия по упрощению и ускорению обнаружения факта и места не-

учтенного потребления электроэнергии в сети в целях оперативного реагирования на появление таких утечек.

Последнее направление является более перспективным, так как направлено в конечном итоге на профилактику неучтенного потребления электроэнергии в сетях, особенно вкупе с принятием мер по взысканию ущерба от неучтенного потребления [10].

Ввиду того, что определение места неучтенного потребления электроэнергии осуществляется на основе данных о падении напряжения на участках сети, для проведения расчетов требуется иметь информацию о конфигурации сети (длина и марка провода каждого участка, общая топология сети и другие параметры), а также показания приборов учета на источнике питания, у потребителей и в других точках. Тогда на основании имеющихся данных можно определить ток небаланса и разность расчетных и фактических значений напряжения на участке сети. При помощи полученных значений в дальнейшем определяется расстояние от начала участка (началом участка считается его край со стороны источника питания) до точки незаконного подключения [11].

Методы исследования. В процессе исследования использованы методы моделирования электрических сетей и происходящих в них процессов с допущением об отсутствии протекания в сети емкостных токов утечки на землю и полном соответствии параметров линии их расчетным (паспортным) значениям, а также базовые законы электротехники.

Допущение об отсутствии емкостных токов утечки на землю сделано на основании того, что в сетях низкого напряжения существованием токов утечки на землю можно пренебречь (но при необходимости их можно рассчитать на основе имеющейся информации об уровне напряжения и конфигурации сети). Кроме того, токи утечки могут изменяться только в случае изменения величины напряжения, поэтому их можно определять единожды для каждого участка сети.

Наиболее удобным способом представления конфигурации сети является таблица (табл. 1).

Упрощенная схема сети, параметры которой заданы в табл. 1, представлена на рис. 1.

Таблица 1. Пример таблицы с исходными данными конфигурации сети

№ участка	Марка провода	Длина l , км	Активное сопротивление участка R , Ом	Реактивное сопротивление участка X , Ом	Напряжение U , В	Ток I , А	Мощность P , кВт
0	Источник питания				240,00	3,97	0,895
1	АС-70/11	8	2,448	302	229,44	3,00	0,666



Рис. 1. Упрощенная схема сети

Очевидно, что ток и напряжение являются комплексными величинами, однако приборы учета позволяют определить лишь модули значений этих величин.

В первую очередь требуется определить, присутствует ли в заданной сети неучтенное потребление. Однако для этого не может быть использован баланс мощностей, так как в данном случае коммерческие потери не могут быть отделены от потерь электрической энергии на элементах линии. Также некорректно производить определение небаланса токов путем прямого вычитания и делать вывод о наличии или отсутствии тока неучтенного потребления, ввиду того что исходные данные передаются с приборов учета, установленных в различных точках сети. В связи с этим значения передаваемых величин токов приведены по углу к значениям соответствующих напряжений. Данный факт не позволяет верно определить небаланс токов в сети, в связи с чем установить факт наличия или отсутствия неучтенного потребления в сети без проведения расчетов невозможно.

Векторная диаграмма токов и напряжений в сети, схема которой показана на рис. 1, поясняющая причины невозможности проведения такого анализа, приведена на рис. 2 для случая, когда ток утечки отсутствует.

Анализ векторной диаграммы (рис. 2) показывает, что даже при отсутствии неучтенного потребления в сети ($i_2 = i_1$) угол сдвига фазы тока относительно напряжения (угол φ), т. е. коэффициент мощности, между \dot{U}_2 и i_2 и между \dot{U}_1 и i_2 различается ввиду влияния комплексного характера сопротивления линии электропередачи.

При возникновении неучтенного потребления в сети различия только усилятся.

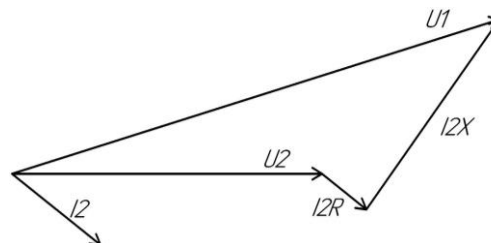


Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжений в линии: U_1 – напряжение в начале участка; U_2 – напряжение в конце участка; i_2 – ток, потребляемый в конце участка; i_{2R} – падение напряжения на активном сопротивлении участка; i_{2X} – падение напряжения на реактивном сопротивлении участка

В связи с этим для составления корректного баланса токов потребуются привести все токи потребителей к единому напряжению – напряжению источника питания \dot{U}_1 . Для этого следует определить расчетное напряжение $\dot{U}_{1\text{расч}}$ относительно напряжения на конце линии. Например, для сети, представленной на рис. 1, $\dot{U}_{1\text{расч}}$ может определяться векторной диаграммой рис. 2 с тем отличием, что допущение об отсутствии в сети неучтенного потребления не делается и поэтому определяемое напряжение $\dot{U}_{1\text{расч}}$ не будет полностью совпадать с его фактическим значением, ввиду неизвестности величины неучтенного тока. Для любой другой сети в общем случае потребуется определить последовательно падения напряжения на каждом участке, начиная с конечного, и при этом производить приведение токов к конечному напряжению. Результатом данных расчетов станет комплексное значение напряжения $\dot{U}_{1\text{расч}}$, модуль которого в общем случае может не совпадать с заданным исходными данными значением $|\dot{U}_1|$. В рамках данного метода этот факт свидетельствует

о предположительном наличии неучтенного потребления в электрической сети.

Затем потребуется привести токи нагрузки всех потребителей в сети по углу сдвига к полученному значению $\dot{U}_{1\text{расч}}$. Тогда может быть составлен баланс токов в сети и определена величина и коэффициент мощности неучтенного тока $\Delta \dot{I}$. Разность между силой тока в отходящей линии от источника питания и суммой токов у потребителей возникает вследствие наличия токов утечки на землю (в том числе, через поврежденные изоляторы) и/или неучтенного потребления электроэнергии.

О наличии на рассматриваемом участке электрической сети незаконных подключений также может говорить факт небаланса отпущенной потребителям электроэнергии с питающей подстанцией и суммой потребленной электроэнергии. Благодаря современным приборам учета, способным передавать показания в автоматическом режиме, стало возможным проводить так называемый «интервальный» контроль за сетью, т. е. передавать показания для обработки через определенные периоды времени. Однако такой метод установления факта наличия неучтенного потребления в сети имеет высокую погрешность по причине отсутствия возможности выделить технологические потери, зависящие от уровня нагрузки ввиду нелинейной зависимости потерь от передаваемой мощности. В связи с этим для обеспечения необходимой точности измерений возникает необходимость в определении дополнительных параметров – величины протекающей активной мощности, на основании чего становится возможным определить коэффициент мощности каждой нагрузки и численно получить активную и реактивную составляющие каждого тока.

Факт превышения разницей отдаваемых и потребляемых токов суммарной погрешности измерительных приборов (за вычетом технически неизбежных токов утечки на землю) является свидетельством наличия на участке неучтенного потребления электроэнергии.

В общем случае, имея в сети N участков ($N > 1$), необходимо определить «подозрительные» участки. «Подозрительным» называется участок, фактическое напряжение $\dot{U}_{\text{факт}}$ в конце которого не совпадает с

расчетным напряжением $\dot{U}_{\text{расч}}$, рассчитанным относительно показаний прибора учета, находящегося на предыдущем участке. Если $\dot{U}_{\text{расч}}$ и $\dot{U}_{\text{факт}}$ в конце участка не совпадают, то точка потребления неучтенного тока $\Delta \dot{I}$ (или его части) находится на данном участке. При этом неучтенный ток вызывает, протекая по части сопротивления этого участка, дополнительное падение напряжения. Расстояние до точки неучтенного потребления электроэнергии от начала участка определяется по сопротивлению участка, на котором происходит падение напряжения. Если $\dot{U}_{\text{расч}}$ и $\dot{U}_{\text{факт}}$ совпадают, то потребление тока, вызванного неучтенным потреблением электроэнергии, происходит на другом участке и данный участок, а также все его параметры могут быть использованы как опорные, в связи с чем условно может быть снижена протяженность рассматриваемой сети за счет вывода части участков из расчета. В конечном итоге определяются участки, содержащие точку неучтенного потребления.

Учитывая то, что напряжение источника питания принято опорным, можно заключить, что известные из исходных данных значения тока источника питания являются корректно заданными. Становится очевидно, что с наибольшей точностью на данном этапе возможно определить расчетное значение напряжения в конце первого по ходу движения от источника питания участка.

Расчетное напряжение в конце участка будет определяться по формуле

$$\dot{U}_{2\text{расч}} = \dot{U}_{1\text{факт}} - \dot{I}_1 \dot{Z}_1, \quad (1)$$

где $\dot{U}_{1\text{факт}}$ – фактическое значение напряжения в начале участка, полученное на основании информации из исходных данных; \dot{I}_1 – ток, отдаваемый в сеть от источника питания; \dot{Z}_1 – сопротивление участка.

В случае, если напряжение $\dot{U}_{2\text{расч}}$, полученное по формуле (1), совпадет по модулю с напряжением $\dot{U}_{2\text{факт}}$, полученным из исходных данных, можно будет заключить, что неучтенное потребление на данном участке отсутствует и полученное комплексное значение $\dot{U}_{2\text{расч}}$ будет являться истинным и сможет использоваться в

дальнейшем как опорное (фактическое). В связи с этим становится возможно условно исключить данный участок из расчета и продолжить «движение» по сети. При этом полученное $\dot{U}_{2\text{расч}}$ можно будет принять как $\dot{U}_{1\text{факт}}$ для «уменьшенной» сети. А ток i_1 в этом случае следует уменьшить на ток нагрузки данного потребителя. Однако следует отметить, что равенство расчетного и фактического значений не гарантирует отсутствие неучтенного потребления непосредственно в точке измерения $\dot{U}_{2\text{факт}}$.

В случае, если напряжение $\dot{U}_{2\text{расч}}$, полученное по формуле (1), не совпадет по модулю с напряжением $\dot{U}_{2\text{факт}}$, полученным из исходных данных, делается вывод о наличии неучтенного потребления на данном участке. Причем модуль $\dot{U}_{2\text{расч}}$ в этом случае должен быть меньше модуля $\dot{U}_{2\text{факт}}$, что будет говорить о том, что неучтенное потребление присутствует внутри участка. Превышение модуля $\dot{U}_{2\text{расч}}$ над модулем $\dot{U}_{2\text{факт}}$ говорит об ошибке в исходных данных или в расчетах.

Так как в общем случае участок, на котором первым обнаружилось неучтенное потребление, не будет последним, то в дальнейшем потребуются произвести движение с конца линии таким же образом, каким производилось описанное выше определение $\dot{U}_{1\text{расч}}$. При этом выполнять это требуется относительно напряжения $|\dot{U}_{N\text{факт}}|$, которое задано в исходных данных.

Расчетное напряжение в начале участка будет определяться по формуле

$$\dot{U}_{N-1\text{расч}} = \dot{U}_{N\text{факт}} + i_N \dot{Z}_N, \quad (2)$$

где $\dot{U}_{N\text{факт}}$ – фактическое значение напряжения в конце участка, полученное на основании информации из исходных данных; i_N – ток, потребляемый на участке N ; \dot{Z}_N – сопротивление участка N .

Совпадение напряжения $\dot{U}_{N-1\text{расч}}$, рассчитанного по формуле (2), с модулем напряжения $\dot{U}_{N-1\text{факт}}$, полученным из ис-

ходных данных, говорит об отсутствии утечки на данном участке. А потому данный участок также может быть исключен из расчета. Однако важным замечанием является то, что перед каждой следующей итерацией следует выполнять приведение тока i_{N-1} к опорному напряжению (напряжению конца линии).

Таким образом, для сети общего случая при проведении двух итераций расчета становится возможным получить два возможных исхода:

–выделение одного участка, на котором установлено наличие неучтенного потребления электрической энергии;

–выделение диапазона участков ($N > 1$), на первом и последнем участке которого установлено наличие неучтенного потребления электрической энергии.

Рассмотрим первый случай, когда определен один участок с наличием неучтенного потребления.

При условии, что известна конфигурация сети и получены единовременно снятые показания приборов учета во всех точках их установки, становится возможным определить расчетное значение напряжения $\dot{U}_{2\text{расч.макс}}$ в одной из точек участка между двумя приборами учета (или другими измерительными устройствами) при условии, что ток небаланса внутри участка отсутствует.

Расчетное значение напряжения $\dot{U}_{2\text{расч.макс}}$ рассчитывается по формуле

$$\dot{U}_{2\text{расч.макс}} = \dot{U}_{1\text{факт}} - i_{2(1)} \dot{Z}_{\text{уч}}, \quad (3)$$

где $\dot{U}_{1\text{факт}}$ – фактическое значение напряжения в начале участка, полученное на основании информации из исходных данных; $i_{2(1)}$ – ток, протекающий через прибор учета, установленный в конце участка, приведенный к напряжению в начале участка $\dot{U}_{1\text{факт}}$ по углу сдвига; $\dot{Z}_{\text{уч}}$ – сопротивление участка.

Очевидно, что $\dot{U}_{2\text{расч.макс}}$ будет являться максимально возможным значением напряжения в конце участка ввиду сделанного допущения (отсутствует протекание неучтенных токов), а потому может быть использовано в качестве опорного для производства расчетов.

Следует отметить, что в общем случае для распределительной сети ток $\dot{I}_{2(1)}$ будет представлять собой суммарный учтенный ток, который протекает по всей длине участка, что подтверждается исходными данными или полученной в ходе расчета информацией.

Тогда фактическое значение напряжения в конце участка, содержащего неучтенный ток $\dot{U}_{2\text{факт}}$, будет определяться по формуле

$$\dot{U}_{2\text{факт}} = \dot{U}_{2\text{расч.макс}} - \dot{I}_{\text{ут}(1)} \dot{Z}_0 I_{\text{ут}}, \quad (4)$$

где $\dot{U}_{2\text{расч.макс}}$ – максимально возможное значение напряжения в конце участка, получаемое на основании расчета по формуле (3); $\dot{I}_{\text{ут}(1)}$ – неучтенный ток, протекающий по части сопротивления участка, приведенный к напряжению в начале участка $\dot{U}_{1\text{факт}}$ по углу сдвига; \dot{Z}_0 – удельное сопротивление участка; $I_{\text{ут}}$ – расстояние от начала участка до места утечки.

В комплексной форме (4) можно переписать как

$$\dot{U}_{2\text{факт}} = (\dot{U}_{2\text{расч.макс.А}} - (\dot{I}_{\text{ут}(1)} \dot{Z}_0)_A I_{\text{ут}}) - j(\dot{U}_{2\text{расч.макс.Р}} - (\dot{I}_{\text{ут}(1)} \dot{Z}_0)_P I_{\text{ут}}), \quad (5)$$

где A – индекс, означающий, что в расчет принимается активная составляющая величины; P – индекс, означающий, что в расчет принимается реактивная составляющая величины.

Уравнение (4) может быть решено для любой корректно заданной распределительной сети. При этом при помощи простейших арифметических преобразований может быть получено квадратное уравнение, имеющее одно неизвестное:

$$\begin{aligned} & |\dot{I}_{\text{ут}(1)} \dot{Z}_0|^2 I_{\text{ут}}^2 - (2 \cdot \dot{U}_{2\text{расч.макс.А}} (\dot{I}_{\text{ут}(1)} \dot{Z}_0)_A + \\ & + 2 \cdot \dot{U}_{2\text{расч.макс.Р}} (\dot{I}_{\text{ут}(1)} \dot{Z}_0)_P) I_{\text{ут}} + \\ & + |\dot{U}_{2\text{расч.макс}}|^2 - |\dot{U}_{2\text{факт}}|^2 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Для найденных корней следует проводить проверку по условию

$$I_{\text{ут}} \leq I_{\text{уч}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{уч}}$ – длина участка.

Искомый корень будет удовлетворять данному условию.

Графически процесс определения точки потребления неучтенного тока показан на фрагменте векторной диаграммы, представленной на рис. 3.

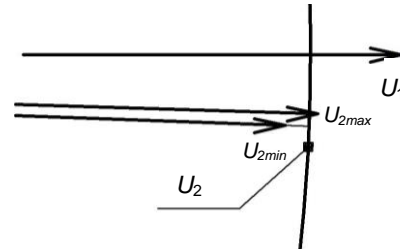


Рис. 3. Векторная диаграмма токов и напряжений в линии: U_1 – напряжение в начале участка; $U_{2\text{макс}}$ – максимально возможное напряжение в конце участка; $U_{2\text{мин}}$ – минимально возможное напряжение в конце участка; U_2 – напряжение в конце участка

Анализ векторной диаграммы (рис. 3) показывает, что $\dot{U}_{2\text{макс}}$ является максимальным по модулю и минимальным по отклонению возможным значением напряжения \dot{U}_2 (при условии, что неучтенный ток не протекает по сопротивлению участка (например, точка его подключения находится в точке \dot{U}_1)), а $\dot{U}_{2\text{мин}}$ является минимальным по модулю и максимальным по отклонению значением напряжения \dot{U}_2 (при условии, что неучтенный ток протекает по всему сопротивлению участка). Кривая \dot{U}_2 в данном случае является частью окружности с радиусом, равным $|\dot{U}_2|$, построенной из начала координат.

Таким образом, решением уравнения (4) будет являться длина прямой, сонаправленной с вектором $\dot{I}_{\text{ут}(1)} \cdot \dot{Z}_0$ и проведенной из конца вектора $\dot{U}_{2\text{макс}}$ до точки пересечения с участком дуги окружности \dot{U}_2 .

Рассмотрим второй случай, когда был выделен диапазона участков ($N > 1$), на первом и последнем участке которого установлено наличие неучтенного потребления электрической энергии.

В данном случае потребуется произвести расчет, аналогичный применяемому для первого случая, дважды (для каждого из участков). При этом основную сложность представляет определение неучтенного тока на каждом из участков. Так как определение доли неучтенного тока на каждом из участков не может быть определено кор-

ректно, то в качестве результата будут получены участки, на которых выявлено неучтенное потребление электрической энергии.

Нетрудно заметить, что при решении приведенных выше уравнений неизбежно будет возникать погрешность в расчетах, вызванная невозможностью определения точного сдвига фазы напряжения у потребителей относительно напряжения источника питания, вследствие чего в расчетах будет накапливаться ошибка, которая может быть снижена до минимума путем проведения дополнительного приведения углов сдвига фаз токов в линии к углу сдвига фазы напряжения, рассматриваемого в качестве базового, но не может быть полностью устранена по причине невозможности определения фактического значения сдвига фазы напряжения у потребителей относительно источника питания в применяемых конструкциях линий электропередачи и приборов учета.

Результаты исследования. Рассмотрим реализацию метода на примере. Зададим сеть, гарантированно имеющую один участок с утечкой. Исходные данные для проведения расчета представлены в табл. 2. Схематичное изображение рассматриваемого участка сети представлено на рис. 1. Расчет производится на примере одной фазы.

Находим, что $\cos\varphi_1 = 0,88675$; $\sin\varphi_1 = 0,4622$; $\cos\varphi_2 = 0,9685$; $\sin\varphi_2 = 0,2490$. Тогда определяем активную и реактивную составляющие тока на подстанции и у потребителя:

$$I_a = I \cos\varphi; \quad (8)$$

$$I_r = I \sin\varphi. \quad (9)$$

Находим, что $I_{1a} = 35,0000$ А, $I_{1r} = 18,2450$ А, $I_{2a} = 19,3701$ А, $I_{2r} = 4,9799$ А.

Таким образом установлено, что в сети присутствует факт неучтенного потребления электроэнергии, так как величина отдаваемого в сеть тока превышает величину потребляемого тока.

По формуле (1) определим расчетное напряжение в конце участка:

$$\dot{U}_{2\text{расч}} = (240,0000 + j \cdot 0) - (36,0160 + j \cdot 16,8341) = 203,9840 - j \cdot 16,8341 \text{ В.}$$

Модуль $\dot{U}_{2\text{расч}}$ составит

$$|\dot{U}_{2\text{расч}}| = 204,6774 \text{ В, что меньше}$$

$$|\dot{U}_{2\text{факт}}| = 214,1451 \text{ В.}$$

На основании этого делается вывод о наличии неучтенного потребления электроэнергии внутри участка.

По формуле (2) определим расчетное напряжение в начале участка относительно напряжения в конце участка (у потребителя):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1\text{расч}} &= (214,1451 + j \cdot 0) + \\ &+ (15,8384 + j \cdot 12,4484) = \\ &= 229,9835 + j \cdot 12,4484 \text{ В.} \end{aligned}$$

Модуль $\dot{U}_{1\text{расч}}$ составит

$|\dot{U}_{1\text{расч}}| = 230,3202$ В. Данное значение также не совпадает с фактически измеренным, что дополнительно подтверждает наличие утечки внутри участка.

По формуле (3) определим максимально возможное напряжение в конце участка: $\dot{U}_{2\text{расч.макс}} = \dot{U}_{1\text{факт}} - \dot{I}_{2(1)} \dot{Z}_{\text{уч}}$. Для этого предварительно определим $\dot{I}_{2(1)}$ – приведенное значение тока в конце участка (\dot{I}_2) к напряжению в начале участка (\dot{U}_1).

Таблица 2. Исходные данные для проведения расчета

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Марка используемого провода	–	АС 70/11	–
Удельное активное сопротивление	r_0	0,306	Ом/км
Удельное индуктивное сопротивление	x_0	0,400	Ом/км
Длина линии	l	2	км
Напряжение источника питания	U_1	240,0000	В
Отдаваемый в сеть ток	I_1	39,4699	А
Отдаваемая в сеть мощность	P_1	8 400,0033	Вт
Напряжение у потребителя	U_2	214,1451	В
Потребляемый из сети ток	I_2	20,0000	А
Потребляемая мощность	P_2	4 184,0124	Вт

Получим приведенное значение тока $\dot{I}_{2(1)} = 19,0726 - j \cdot 6,0195$ А. Оно находится следующим образом: определяется угол сдвига тока \dot{I}_2 относительно напряжения $\dot{U}_{2\text{факт}}$ (0,2516 радиан по часовой стрелке), затем находятся угол сдвига напряжения $\dot{U}_{1\text{расч}}$ относительно $\dot{U}_{2\text{факт}}$ (0,0541 радиан против часовой стрелки) и угол сдвига тока \dot{I}_2 относительно напряжения $\dot{U}_{1\text{расч}}$ (0,3057 радиан по часовой стрелке). Далее определяется приведенный коэффициент мощности $\cos \varphi_{2(1)} = 0,9536$, при помощи которого определяются значения активной и реактивной составляющей приведенного тока.

Тогда получим

$$\dot{U}_{2\text{расч.макс}} = 240,0000 + j \cdot 0 - (16,4881 + j \cdot 11,5742) = 223,5119 - j \cdot 11,5742 \text{ В.}$$

Модуль $\dot{U}_{2\text{расч.макс}}$ составит

$$|\dot{U}_{2\text{расч.макс}}| = 223,8114 \text{ В.}$$

Далее по формуле (4) требуется найти расстояние от начала участка до места утечки $I_{\text{ут}}$. Для этого необходимо определить величину неучтенного тока, приведенного к напряжению в начале участка (\dot{U}_1) – $\dot{I}_{\text{ут}(1)}$.

Приведенное значение тока утечки определяется разностью измеренного значения тока в начале участка и приведенного к напряжению в начале участка тока в конце участка ($\dot{I}_{2(1)}$). Тогда приведенное значение тока утечки будет определяться как $\dot{I}_{\text{ут}(1)} = \dot{I}_1 - \dot{I}_{2(1)}$ и в численном выражении его величина составит $\dot{I}_{\text{ут}(1)} = 15,9274 - j \cdot 12,2255$ А.

Затем численно определим коэффициенты квадратного уравнения (6): $102,2517 \cdot I_{\text{ут}}^2 - 4303,8740 \cdot I_{\text{ут}} + 4233,421 = 0$.

Решением данного уравнения будут являться два корня: $I_{\text{ут}1} = 1,0078$ км и $I_{\text{ут}2} = 43,0830$ км. Однако условию (7) соответствует только корень $I_{\text{ут}1}$.

Следовательно, на рассматриваемом участке сети на расстоянии в 1,0078 км от источника питания присутствует незаконное технологическое присо-

единение, через которое потребляется ток $\dot{I}_{\text{ут}(1)} = 15,9274 - j \cdot 12,2255$ А, что вызывает дополнительное падение напряжения $\Delta \dot{U}_д = 9,8398 - j \cdot 2,6504$.

Далее следует выполнить проверку проведенных расчетов:

$$\dot{U}_{2\text{расч}} = \dot{U}_{1\text{факт}} - \dot{I}_{2(1)} \dot{Z}_{\text{уч}} - \dot{I}_{\text{ут}(1)} \dot{Z}_0 I_{\text{ут}} = 213,6721 - j \cdot 14,2245 \text{ В.}$$

Модуль $\dot{U}_{2\text{расч}}$ составит

$$|\dot{U}_{2\text{расч}}| = 214,1451 \text{ В.}$$

В сети общего случая, когда число участков составляет два и более, расчет следует проводить таким же образом.

В том случае, если в сети находится несколько участков, содержащих точки неучтенного потребления (пример представлен на рис. 4, где такие участки выделены пунктиром), расчет может быть произведен отдельно для каждого ответвления от основной магистрали.

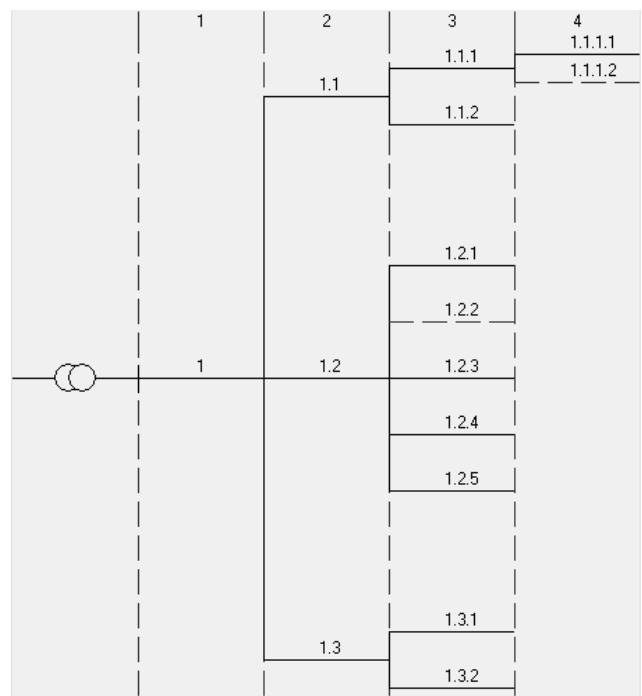


Рис. 4. Пример распределительной сети, имеющей сложную конфигурацию

Область применения данного метода довольно широка. Он может применяться как для выборочных проверок «подозрительных» сетей, которые характеризуются существенным небалансом электроэнергетики, так и для автоматического контроля, что позволит оперативно реагировать на

появление неучтенных подключений и буквально «ловить за руку» недобросовестных потребителей.

В общем случае рассматривается участок сети, оборудованный интеллектуальными приборами учета, которые установлены как на питающей подстанции (где измеряется объем и параметры электроэнергии, отпускаемой потребителям), так и в концах участков с учетом их возможных разветвлений, т. е. у конечных потребителей (измеряются объем и параметры получаемой электроэнергии).

При этом определение факта и места возникновения коммерческих потерь возможно внутри замкнутой контролируемой сети и любой отбор электроэнергии из какого-либо ее участка, не учитываемый соответствующим образом, будет регистрироваться как факт хищения.

Однако при таком способе контроля, когда измерения проводятся только для учета потребленной электроэнергии за отчетный период (месяц), т. е. через сравнительно большие интервалы времени, выявление неучтенного потребления электроэнергии возможно только в том случае, когда потребление осуществляется непосредственно в момент проведения измерения. Что в случае хорошей осведомленности и технической оснащенности некоторых потребителей может являться слабым местом метода.

Для обеспечения своевременности обнаружения неучтенного потребления может использоваться один из двух вариантов:

1) постоянный контроль – измерения через минимальные интервалы времени (в результате увеличивается точность до максимального уровня, но при этом растут необходимые вычислительные мощности и в некоторых случаях затраты на передачу данных);

2) внезапный контроль (в дополнение к учетному) – измерения через случайные интервалы времени (в результате уменьшается вероятность своевременно обнаружить неучтенное потребление, при этом снижается нагрузка на вычислительные устройства).

Определение факта неучтенного потребления электроэнергии осуществляется по факту небаланса за рассматриваемый период. Данный метод является способом непрерывного контроля: благодаря

тому, что приборы учета фиксируют всю отдаваемую и потребляемую электроэнергию, имеется возможность установления факта неучтенного потребления в интервалах времени между измерениями. Недостатком такого метода является высокая погрешность, поскольку отсутствует возможность выделить технологические потери, зависящие от уровня нагрузки, ввиду нелинейной зависимости потерь от передаваемой мощности. В связи с этим для уточнения факта неучтенного потребления возникает необходимость в измерении дополнительного параметра – величины протекающего тока.

В большинстве случаев в сети будет существовать небаланс между величиной тока в отходящей с подстанции линии и суммой токов у потребителей. Это происходит вследствие наличия токов утечки на землю и неучтенного потребления электроэнергии, а также комплексного характера протекающих токов и разницы между их арифметической и геометрической суммой.

Факт наличия утечки в сети фиксируется при появлении превышающего суммарную погрешность приборов небаланса отдаваемого и потребляемого токов (необходимо рассчитывать не арифметическую сумму потребляемых токов, а геометрическую) за вычетом тока утечки на землю.

Следует отметить, что анализ электрической сети на предмет наличия в ней коммерческих потерь для сетей 0,4 кВ следует выполнять пофазно ввиду повсеместной несимметричности нагрузки линий электропередачи данного класса напряжения в коммунально-бытовом секторе, а также ввиду особенностей выполнения неучтенного потребления электрической энергии. По статистике, наиболее часто неучтенно подключаются мощные бытовые однофазные электроприемники (сварочный аппарат, различные нагревательные элементы и т. п.). В сетях класса напряжения 6–10 кВ расчет допустимо производить для одной фазы в целях сокращения времени, затрачиваемого на проведение анализа одной сети.

Выводы. Разработанный и описанный метод определения факта и места возникновения коммерческих потерь в распределительных сетях позволяет устанавливать факт, а также определять величину и место неучтенного потребления электрической энергии в распределительных сетях.

В силу того, что в результате работы метода выявляются все существующие в сети утечки тока, обнаруженное «неучтенное потребление электрической энергии» на практике может быть вызвано неисправностью какого-либо элемента сети (например, изолятора, через который происходит значительная утечка тока).

Таким образом, становится возможным не только регистрировать незаконные подключения, но и производить «профилактику» сети, обнаруживая элементы сети в неудовлетворительном техническом состоянии.

Точность получаемых значений величины неучтенного тока на участках сети и координат места «подключения» является достаточной для практического использования, так как протяженность участка сети в сельских электрических сетях низкого напряжения, как правило, невелика³.

Очевидно, что применение метода, позволяющего своевременно и надежно выявлять самовольные подключения в сетях, позволит оперативно устранять такие подключения и, как следствие, сделает возможным снижение издержек электросетевых компаний и повышение надежности электроснабжения сельских электрических сетей.

В качестве перспективного направления продолжения исследований по данной проблеме можно рассматривать поиск решений для создания возможности автоматизации (алгоритмизации) расчетов и проведения анализа состояния электрических сетей на предмет наличия в них коммерческих потерь.

Список литературы

1. Казымов И.М., Компанец Б.С. Методика определения места незаконных подключений в магистральных распределительных сетях низкого напряжения // Горизонты образования. – 2017. – № 19. – С. 17–20.
2. Казымов И.М., Компанец Б.С. Математическая модель методики определения незаконных подключений в распределительной сети // Горизонты образования. – 2016. – № 18. – С. 32–34.
3. Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review / J.L. Viegas,

³ Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

P.R. Esteves, R. Melício, et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 80. – P. 1256–1268.

4. Ahmad T. Non-technical loss analysis and prevention using smart meters // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 72. – P. 573–589.

5. Large-scale detection of non-technical losses in imbalanced data sets / P. Glauner, A. Boechat, L. Dolberg, et al. // IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT. – 2016.

6. Kochneva E., Sukalo A. Impact of technical losses calculation method on bad data validation on the basis of a posteriori analysis // IEEE International Energy Conference, ENERGYCON. – 2016.

7. Non-technical losses identification using Optimum-Path Forest and state estimation / R.D. Trevizan, A. Rossoni, A.S. Bretas, et al. // IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech. – 2015.

8. Huang S.C., Lo Y.L., Lu C.N. Non-technical loss detection using state estimation and analysis of variance // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – Vol. 28, issue 3. – P. 2959–2966.

9. Kazymov I., Kompaneets B. Definition of fact and place of losses in low voltage electric networks // 2019 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2019.

10. Казымов И.М., Компанец Б.С. Разработка эффективной методики обнаружения коммерческих потерь электроэнергии в сельских электрических сетях низкого напряжения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 11(181). – С. 161–165.

11. Казымов И.М., Компанец Б.С. Математическая модель методики определения незаконных подключений в распределительной сети // Горизонты образования. – 2016. – № 18. – С. 32–34.

12. Neto E.A.C., Coelho, J. Probabilistic methodology for Technical and Non-Technical Losses estimation in distribution system // Electric Power Systems Research. – 2013. – Vol. 97. – P. 93–99.

References

1. Kazymov, I.M., Kompaneets, B.S. Metodika opredeleniya mesta nezakonnykh podklyucheniy v magistral'nykh raspredelitel'nykh setyakh nizkogo napryazheniya [The method of determining the place of illegal connections in the single line low voltage networks]. *Gorizonty obrazovaniya*, 2017, no. 19, pp. 17–20.
2. Kazymov, I.M., Kompaneets, B.S. Matematicheskaya model' metodiki opredeleniya

nezakonnykh podklyucheniy v raspredelitel'noy seti [Mathematical model of the method for determining illegal connections in a distribution network]. *Gorizonty obrazovaniya*, 2016, no. 18, pp. 32–34.

3. Viegas, J.L., Esteves, P.R., Melício, R., Mendes, V.M.F., Vieira, S.M. Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 80, pp. 1256–1268.

4. Ahmad, T. Non-technical loss analysis and prevention using smart meters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 72, pp. 573–589.

5. Glauner, P., Boechat, A., Dolberg, L., State, R., Bettinger, F., Rangoni, Y., Duarte, D. Large-scale detection of non-technical losses in imbalanced data sets. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT*, 2016.

6. Kochneva, E., Sukalo, A. Impact of technical losses calculation method on bad data validation on the basis of a posteriori analysis. *IEEE International Energy Conference, ENERGYCON*, 2016.

7. Trevizan, R.D., Rossoni, A., Bretas, A., Gazzana, D.S., Bretas, N., Bettiol, A.L., Carniato, A., Passos, L.F. Non-technical losses identification using Optimum-Path Forest and state estimation. *IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech*, 2015.

8. Huang, S.C., Lo, Y.L., Lu, C.N. Non-technical loss detection using state estimation and analysis of variance. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, vol. 28, issue 3, pp. 2959–2966.

9. Kazymov, I. Kompaneets, B. Definition of fact and place of losses in low voltage electric networks. *2019 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2019.

10. Kazymov, I.M. Kompaneets, B.S. Razrabotka effektivnoy metodiki obnaruzheniya kommercheskikh poter' elektroenergii v sel'skikh elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya [Development of an effective method for detecting commercial losses of electricity in rural low-voltage electrical networks]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, no. 11, pp. 161–165.

11. Kazymov, I.M., Kompaneets, B.S. Matematicheskaya model' metodiki opredeleniya nezakonnykh podklyucheniy v raspredelitel'noy seti [Mathematical model of the method for determining illegal connections in a distribution network]. *Gorizonty obrazovaniya*, 2016, no. 18, pp. 32–34.

12. Neto, E.A.C., Coelho, J. Probabilistic methodology for Technical and Non-Technical Losses estimation in distribution system. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 97, pp. 93–99.

УДК 621.311

Владимир Александрович Шуин

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

Юрий Дмитриевич Кутумов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Наталья Владимировна Кузьмина

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова

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

Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю

Авторское резюме

Состояние вопроса. Как правило, в публикациях, посвященных расчетам переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ, не учитывается зависимость индуктивностей кабельных линий от частоты, что в некоторых случаях может привести к существенным погрешностям в оценках параметров переходных токов и напряжений. В связи с этим актуальной является задача оценки указанных погрешностей и определения области применения частотно-независимых схем замещения и моделей кабельных линий 6–10 кВ при расчетах и моделировании переходных процессов при ОЗЗ.

Материалы и методы. Для исследования влияния частотной зависимости индуктивностей кабельных линий 6–10 кВ на точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ использован программный комплекс для моделирования электроэнергетических систем PSCAD/EMTDC, позволяющий создавать модели электрических сетей с применением как частотно-зависимых, так и частотно-независимых моделей кабельных ЛЭП только с круглыми жилами. Для проверки адекватности частотно-зависимой модели трехфазного кабеля, разработанной в PSCAD, использована частотно-зависимая модель трехфазного кабеля 6–10 кВ с секторными жилами, выполненная в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Результаты. Сформулирован подход к разработке моделей кабельных ЛЭП 6–10 кВ с параметрами, зависящими и не зависящими от частоты. Получены оценки погрешностей определения параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ при использовании моделей кабельных ЛЭП, не учитывающих зависимости индуктивностей от частоты (для разрядных составляющих – 15–20 %, для зарядных составляющих – 5–10 %). Показано, что модели, в которых параметры кабельных линий определены по скорости распространения электромагнитной волны, могут применяться для приближенных расчетов переходных токов и напряжений при решении большинства задач, связанных с исследованиями переходных процессов при ОЗЗ.

Выводы. Применение разработанных рекомендаций по определению параметров трехфазных кабельных линий 6–10 кВ повысит точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. Обеспечить требуемую для разработки методов дистанционного определения места замыкания на землю в сетях 6–10 кВ точность позволяет только применение частотно-зависимых моделей кабельных линий.

Ключевые слова: кабельные линии 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, переходные процессы, параметры кабельной линии

Vladimir Alexandrovich Shuin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vshuin@mail.ru

Yuri Dmitrievich Kutumov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Natalia Vladimirovna Kuzmina

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Tatiana Yurievna Shadrikova

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

Simulation study of 6–10 kV cable lines for transient processes calculation during earth faults

Abstract

Background. As a rule, researchers do not consider the dependence of the inductance of cable lines on frequency in their scientific papers devoted to the calculation of transient processes during single phase-to-ground fault in 6–10 cable networks. In some cases, it can lead to significant errors in evaluation of current and voltage transient components parameters. Therefore, it is an urgent task to estimate defined errors and the scope of application of frequency-independent equivalent circuits and models of 6–10 kV cable lines during calculation and simulation of transient processes in case of single phase-to-ground fault.

Materials and methods. The authors applied PSCAD / EMTDC software to study the effect of the frequency dependence of the inductances of 6–10 kV cable lines on the calculation accuracy of transient processes during single phase-to-ground fault. It allows to simulate electric power systems models with the usage of both frequency-dependent and frequency-independent cable line models with round conductors only. To check the adequacy of the frequency-dependent three phase cable model developed in PSCAD software, the authors have used a frequency-dependent model of 6–10 kV three-phase cable with sector-shaped conductors designed in COMSOL Multiphysics software.

Results. The authors have developed an approach to develop of 6–10 kV cable lines models with frequency-dependent and frequency-independent parameters. The authors have obtained error estimation in transient current and voltage parameters during single phase-to-ground fault in cable networks models that do not consider the frequency dependence on inductance (for discharge components the error is 15–20 %, for charging components the error is equal to 5–10 %). It is shown that models with cable line parameters defined according to spreading speed of electromagnetic wave, can be used for approximate calculation of transient current and voltage to solve most of tasks of investigation of transient processes during single phase-to-ground faults.

Conclusions. Application of the developed recommendations to determine three phase medium voltage cable lines parameters will increase the calculation accuracy of transient processes during single phase-to-ground faults in 6–10 kV cable networks. Only application of frequency-dependent models of cable lines allows us to provide required accuracy to develop methods of distant earth fault localization in 6–10 kV networks.

Key words: 6–10 kV cable lines, single phase-to-ground fault, transient processes, cable line parameters

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.030-040

Введение. Примерно половина вырабатываемой в стране электроэнергии распределяется потребителям через кабельные сети среднего напряжения 6–35 кВ, более 99 % суммарной протяженности которых составляют сети напряжением 6–10 кВ¹. Преобладающим видом повреждений в указанных сетях являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Наибольшую опасность представляют дуговые перемежаю-

щиеся ОЗЗ (ДПОЗЗ) в кабельных сетях, работающих с изолированной нейтралью, сопровождающиеся интенсивными переходными процессами при повторных зажиганиях заземляющей дуги и обусловленными ими опасными перенапряжениями и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения [1–3]. Переходные процессы при ДПОЗЗ оказывают также значительное влияние на селективность и устойчивость функционирования устройств защиты от замыканий на землю [4, 5]. Учитывая сказанное, точность расчетов параметров переходных токов и напря-

¹ Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

жений при ДПОЗЗ играет существенную роль при решении таких задач, как выбор методов и средств защиты электрооборудования кабельных сетей 6–10 кВ от перенапряжений и термического действия тока в месте повреждения, разработка способов повышения селективности и устойчивости функционирования защит от данного вида повреждений, разработка устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов, разработка методов дистанционного определения места ОЗЗ (ДОМЗЗ) на кабельных линиях (КЛ) по параметрам переходного процесса и др.

Основными методами исследования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения являются аналитические расчеты с использованием упрощенных математических моделей [5–11] и имитационное моделирование с применением специально разработанных программ, а также современных программных комплексов для научно-технических расчетов в электроэнергетике и электротехнике (Matlab, PSCAD, RTDS, ATPDesigner [12–16]. И в том, и в другом случаях достоверность результатов расчетов переходного процесса при ОЗЗ определяется точностью учета продольных параметров кабельных линий (прежде всего, индуктивностей прямой и нулевой последовательностей), которые в общем случае зависят от частоты переходных токов.

Анализ публикаций, посвященных исследованию переходных процессов при ОЗЗ, показал, что в расчетных схемах замещения и имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, как правило, используются модели КЛ, параметры которых не зависят от частоты (частотно-независимые модели). При определении значений погонных индуктивностей прямой $L_{1л}$ и нулевой $L_{0л}$ последовательностей частотно-независимых моделей КЛ 6–10 кВ, как правило, используются два подхода:

1) по справочным данным, полученным на частоте 50 Гц;

2) по скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей (каналах «фаза–фаза» и «фаза–земля»):

$$L_{1л} = L_{2л} \approx \frac{1}{V_1^2 C_{1л}}; \quad (1)$$

$$L_{0л} \approx \frac{1}{V_0^2 C_{0л}}, \quad (2)$$

где $C_{1л}$ и $C_{0л}$ – емкости прямой и нулевой последовательностей КЛ соответственно; V_1 , V_0 – скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей КЛ (в каналах «фаза–фаза» и «фаза–земля»), принимаемые для трехфазных КЛ 6–10 кВ равными 150–160 м/мкс [17]).

Применение при расчетах переходных процессов при ОЗЗ частотно-независимых моделей КЛ приводит к погрешностям в оценке параметров (амплитуды, частоты, постоянных затухания и др.) переходных токов и напряжений. В связи с этим актуальной задачей является оценка указанных погрешностей и определение допустимости и области применения частотно-независимых моделей КЛ при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ.

Методы исследования. Для проведения исследований влияния зависимости индуктивностей кабельных линий 6–10 кВ от частоты на точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ использовался программный комплекс для моделирования электроэнергетических систем PSCAD/EMTDC, позволяющий создавать модели электрических сетей с применением как частотно-зависимых, так и частотно-независимых моделей КЛ. В качестве эталонной частотно-зависимой модели использовалась модель Frequency Dependent (Phase) Model [18], реализованная с помощью компонента Cable системы моделирования PSCAD и являющаяся наиболее точной из описанных в научной литературе моделей для выполнения расчетов переходных процессов и установившихся режимов в кабельных ЛЭП. В качестве частотно-независимых моделей КЛ 6–10 кВ использовались модели на основе компонента Cable, погонные значения продольных параметров которых определялись для фиксированной частоты (частотно-независимая модель Bergeron [19]).

Компонент Cable программного комплекса PSCAD позволяет создавать модели кабеля только с проводниками круглого сечения, в то время как кабельные сети 6–10 кВ состоят на ~95 % из трехфазных кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) и секторными жилами. Для проверки адекватности частотно-зависимой модели трехфазного кабеля с круглыми жилами в PSCAD реальному трехфазному кабелю 6–10 кВ с секторными жилами использова-

лась частотно-зависимая модель последнего, выполненная с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics [18].

Имитационная модель кабельной сети в PSCAD. Расчетная схема кабельной сети напряжением 6 кВ для анализа влияния зависимости параметров КЛ от частоты на погрешности расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ приведена на рис. 1.

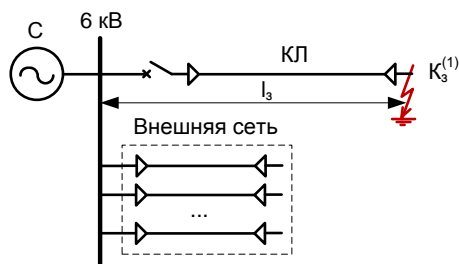


Рис. 1. Однолинейная схема кабельной сети 6 кВ для исследования влияния зависимости продольных параметров КЛ от частоты на погрешности расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ

Схема сети включает в себя кабельную линию для анализа переходных процессов при различных расстояниях l_3 места ОЗЗ от шин источника питания, трехфазный источник питания (систему С) с номинальным напряжением 6 кВ и кабельные линии внешней сети. Схема имитационной модели кабельной сети в программном комплексе PSCAD приведена на рис. 2. Параметры исследуемой сети (суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$, длина кабельной линии КЛ, индуктивность источника питания, переходное сопротивление в месте повреждения и др.) при проведении вычислительных экспериментов могут изменяться.

Модель кабельной линии КЛ в PSCAD реализована с помощью компонента Cable, в котором, кроме конструктивных параметров кабеля, может быть задана зависимость индуктивностей и активных сопротивлений от частоты (частотно-зависимая модель Frequency Dependent (Phase) Model Options) или отсутствие указанной зависимости (частотно-независимая модель Bergeron) (рис. 3).

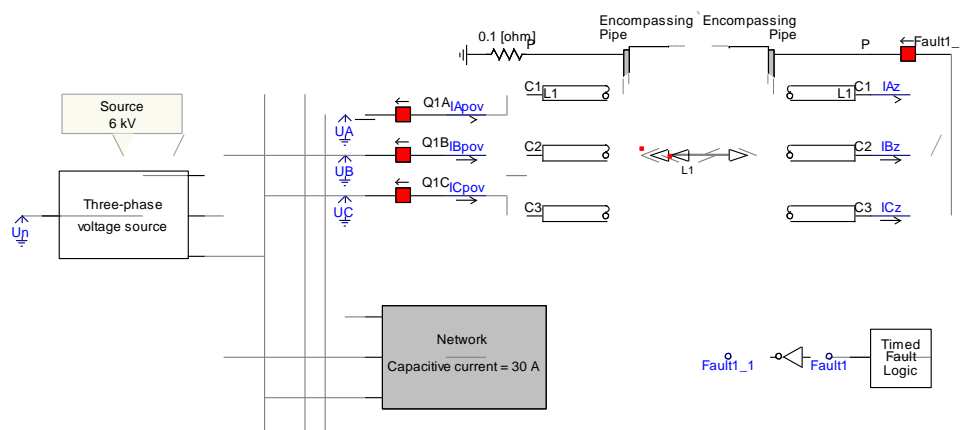


Рис. 2. Имитационная модель кабельной сети 6 кВ в PSCAD

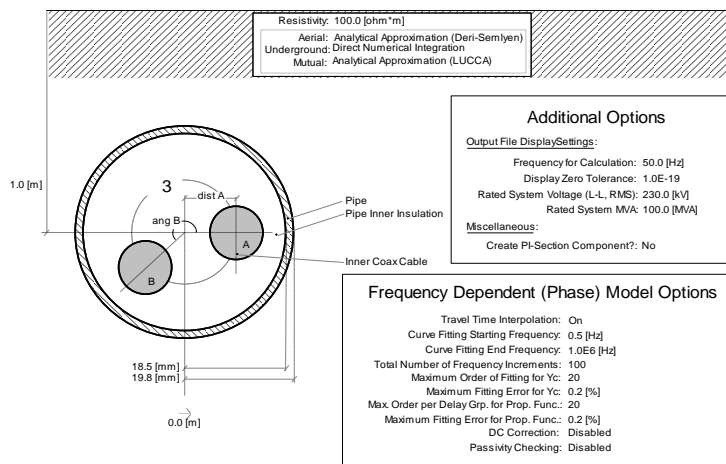


Рис. 3. Окно параметров частотно-зависимой модели КЛ, реализованной в PSCAD на основе компонента Cable

Проверка адекватности модели КЛ в PSCAD реальной КЛ 6–10 кВ с секторными жилами. Как отмечено выше, в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ в основном применяются трехфазные кабели с БПИ и секторными жилами. Различие конструкции жил трехфазной КЛ, реализуемой на базе компонента Cable в PSCAD, и реальной КЛ 6–10 кВ в общем случае обуславливает различие их частотных характеристик для каналов «фаза–фаза» и «фаза–земля», т. е. сопротивлений прямой и нулевой последовательностей для одного и того же значения частоты переходного тока. Поэтому результаты расчетов переходных процессов, полученные на модели сети в PSCAD, будут иметь практическую значимость для кабельных сетей 6–10 кВ, если модель КЛ с круглыми жилами с приемлемой при решении указанных выше задач точностью будет адекватна реальной КЛ с секторными жилами.

Известно [1, 5], что в переходном процессе, возникающем при ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения, можно выделить две стадии, различающиеся по частоте колебаний свободных составляющих токов и напряжений и времени их затухания. Первая стадия связана с разрядом емкости поврежденной фазы и перезарядом междупазных емкостей и называется разрядной, вторая стадия связана с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз через индуктивность источника питания и называется зарядной. В кабельных сетях 6–10 кВ частота зарядных колебаний может иметь значения от сотен герц до ~2–3 кГц, разрядных колебаний – от ~3 кГц до нескольких десятков килогерц [5]. С учетом указанного различия частот разрядной и зарядной стадий первую из них часто называют высокочастотной, вторую – среднечастотной стадией переходного процесса при ОЗЗ. Время затухания высокочастотных разрядных колебаний в реальных кабельных сетях 6–10 кВ обычно не превышает нескольких сотен микросекунд, зарядных среднечастотных – 3–5 мс [1]. Отметим, что расчеты на моделях, не позволяющие полностью учесть все факторы, влияющие на активные потери в контуре нулевой последовательности, дают значения полного времени затухания переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ до 7–10 мс [5].

Практически приемлемую точность измерений переходных токов и напряжений при ОЗЗ в целях решения указанных выше задач можно обеспечить только при частоте высокочастотных колебаний не более ~20 кГц, так как применяемые в кабельных сетях 6–10 кВ в качестве первичных преобразователей тока и напряжения электромагнитные трансформаторы тока и напряжения обеспечивают достаточную точность преобразования (погрешности не более 5–10 %) только при указанной частоте первичных токов и напряжений. Таким образом, адекватность модели КЛ с круглыми жилами реальной КЛ 6–10 кВ с секторными жилами должна оцениваться в диапазоне частот от 50 Гц (установившийся режим ОЗЗ) до ~20 кГц.

Для обеспечения адекватности модели КЛ с круглыми жилами в PSCAD реальной КЛ 6–10 кВ с секторными жилами на частоте 50 Гц должны выполняться следующие условия:

$$F_m \approx F_k; \quad (3)$$

$$F_{об.м} \approx F_{об.к}; \quad (4)$$

$$L_{0м(50 Гц)} \approx L_{0к(50 Гц)}; \quad (5)$$

$$L_{1м(50 Гц)} \approx L_{1к(50 Гц)}; \quad (6)$$

$$C_{0м} \approx C_{0к}; \quad (7)$$

$$C_{1м} \approx C_{1к}, \quad (8)$$

где F , $F_{об}$ – сечение жилы и оболочки кабеля, мм²; C_0 , C_1 – емкость нулевой и прямой последовательностей, Ф/км; $L_{0(50 Гц)}$, $L_{1(50 Гц)}$ – индуктивность нулевой и прямой последовательностей в области низких частот, Гн/км; индексами «м» и «к» обозначены соответственно параметры модели в PSCAD и кабеля-прототипа (в качестве прототипа в расчетной схеме сети (рис. 1) был выбран кабель ААБл-6-3х240).

Выполнение условий (3) и (4) обеспечивает равенство активных сопротивлений модели и кабеля-прототипа для составляющих нулевой и прямой последовательностей, условий (5) и (6) – равенство индуктивностей нулевой и прямой последовательностей, соотношений (7) и (8) – равенство емкостей нулевой и прямой последовательностей при любых частотах.

На параметры (частоту, амплитуду, постоянную затухания и др.) разрядной и зарядной составляющих переходного тока в месте ОЗЗ и напряжений на шинах источника питания в кабельных сетях 6–10 кВ оказывают влияние не только частотные

характеристики каналов прямой и нулевой последовательностей поврежденной КЛ, но и другие факторы. Основными из них являются суммарный емкостный ток сети I_{Σ} , расстояние l_3 до места повреждения от шин источника питания, индуктивность источника питания [1, 5, 8].

С учетом влияния на параметры переходных токов и напряжений указанных дополнительных факторов для проверки адекватности модели КЛ с круглыми жилами в области средних и высоких частот, соответствующих зарядной и разрядной стадиям переходного процесса при ОЗЗ, использовалась прямая верификация путем сравнения результатов расчетов переходных токов и напряжений на модели кабельной сети в PSCAD (рис. 2) с результатами расчетов, полученными на модели аналогичной сети, в которой в качестве КЛ1 использовалась модель кабеля-прототипа типа ААБл-6-3х240, выполненная на основе других математических методов. В качестве такой модели может быть принята частотно-зависимая модель КЛ 6–10 кВ с секторными жилами, полученная с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics, позволяющего с высокой точностью моделировать любые физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями [18].

На рис. 4 приведена модель сети 6 кВ в программном комплексе COMSOL Multiphysics, где L_s , R_s – индуктивность и активное сопротивление источника питания; $C_{m\phi}$, $C_{0\phi}$ – емкость между фазами и между фазой и оболочкой КЛ; L_{ph} , R_{ph} – индуктивность и активное сопротивление фазной жилы КЛ; L_{sh} , R_{sh} – индуктивность и активное сопротивление оболочки КЛ; M_0 , M_m – взаимная индуктивность между фазой и оболочкой и между двумя фазами КЛ; G_{0net} , C_{0net} – суммарная поперечная проводимость и емкость нулевой последовательности внешней сети; G_{mnet} , C_{mnet} – суммарная проводимость и емкость между фазами внешней сети; $K_3^{(1)}$ – элемент, моделирующий ОЗЗ.

При создании модели сети 6 кВ в программном комплексе COMSOL Multiphysics используются расчетные модули Magnetic Fields, Electric circuits и Electric currents. В расчетном модуле Magnetic Fields реализована полевая модель магнитной составляющей электро-

магнитного поля исследуемой КЛ; в модуле Electric circuit – модель внешней сети и источника питания 6 кВ. Использование модуля Magnetic Fields позволяет получить модель КЛ с секторными жилами и частотно-зависимыми продольными параметрами (индуктивностями и активными сопротивлениями). Величины емкостей КЛ предварительно определяются по полевой модели, реализованной с применением расчетного модуля Electric currents.

Модели сети 6 кВ в PSCAD (рис. 2, 3) и COMSOL Multiphysics (рис. 4) имеют одинаковые параметры и отличаются только моделями линии КЛ. При верификации сравнивались результаты расчетов по указанным моделям переходного тока в месте ОЗЗ, напряжения на поврежденной и неповрежденной фазах на шинах источника питания и напряжения на нейтрали сети (напряжения нулевой последовательности). При верификации варьировались расстояние l_3 места повреждения от шин источника питания и параметры внешней сети (т.е. суммарный емкостный ток сети I_{Σ}). На рис. 5 в качестве примера дано сравнение результатов расчетов переходного тока в месте ОЗЗ при $l_3 = 0,5$ км и $l_3 = 1$ км в сети 6 кВ с $I_{\Sigma} = 30$ А.

Анализ результатов верификации показал, что погрешности расчетов основных параметров свободных составляющих переходных токов и напряжений (амплитуды и частоты) при ОЗЗ на модели в PSCAD, по сравнению с моделью в COMSOL Multiphysics, не превышают следующих значений:

- 15–20 % в разрядной (высокочастотной) стадии переходного процесса, длящейся несколько сотен микросекунд;
- 5–10 % в зарядной (среднечастотной) стадии переходного процесса, длящейся до ~10 мс;
- не более 5 % в установившемся режиме ОЗЗ (низкочастотной стадии процесса).

Полученные оценки точности расчетов позволяют сделать вывод о том, что модель КЛ с круглыми жилами при выполнении условий (3)–(8) позволяет обеспечить с практически достаточной точностью адекватность модели реальной трехфазной КЛ 6–10 кВ с БПИ и секторными жилами на среднечастотной (зарядной) стадии переходного процесса и в установившемся режиме ОЗЗ.

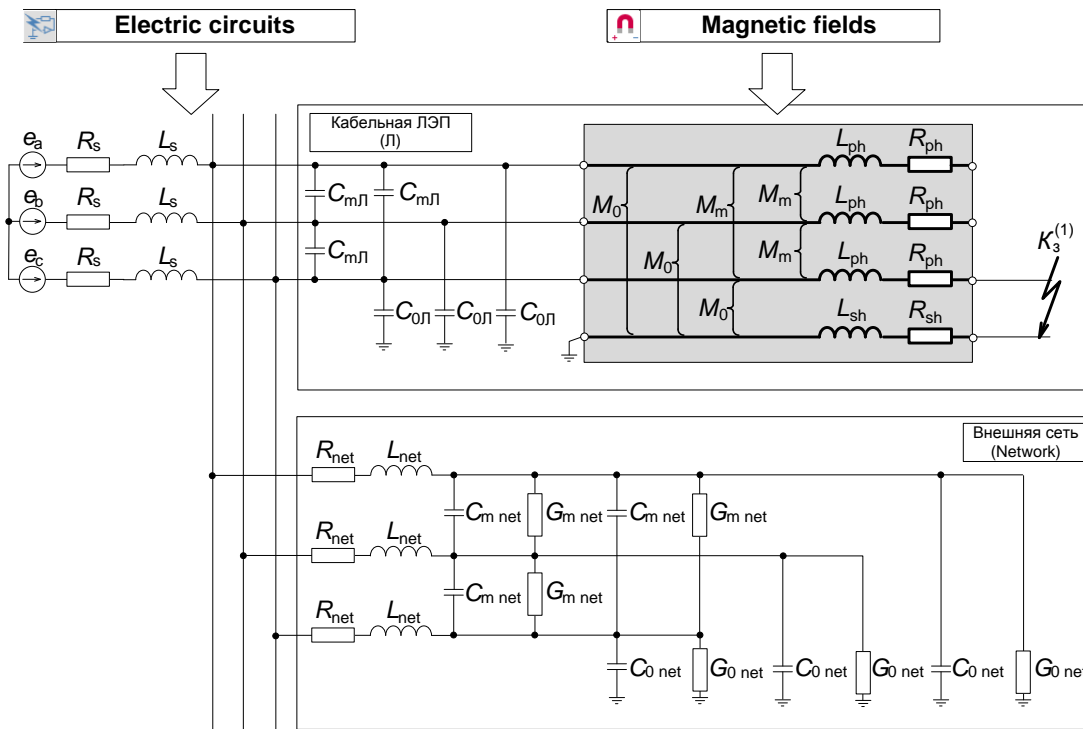
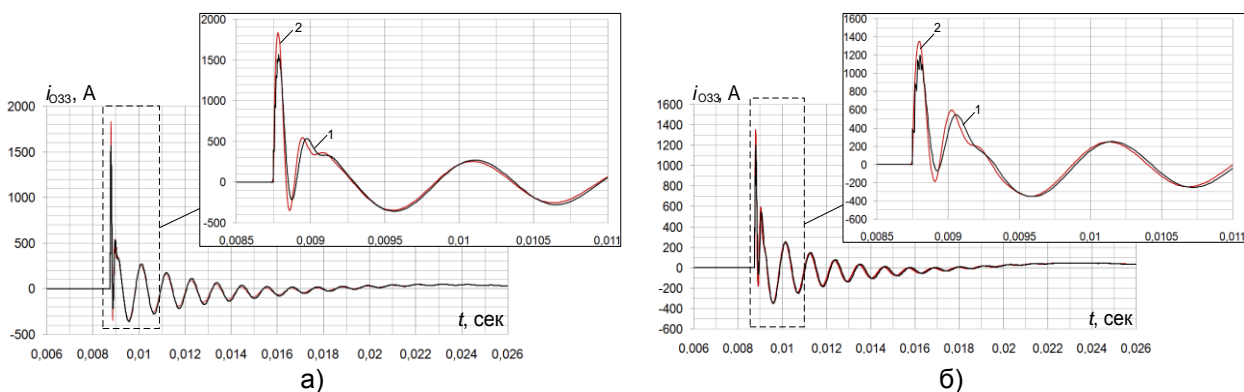


Рис. 4. Модель сети 6 кВ в программном комплексе COMSOL Multiphysics

Рис. 5. Сравнение результатов расчета переходного тока ОЗЗ в сети 6 кВ с $I_{\Sigma} = 5$ А с использованием модели КЛ1 с круглыми жилами в PSCAD (кривая 1) и модели КЛ1 в COMSOL Multiphysics (кривая 2): а – $l_3 = 0,5$ км; б – $l_3 = 1$ км

Отметим, что погрешности расчетов параметров высокочастотной разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ в силу быстрого ее затухания практически не оказывают влияния на оценки среднеквадратичного значения тока в месте повреждения и величину максимальных перенапряжений при ДПОЗЗ. Более точные оценки параметров разрядной составляющей требуются только в задачах ДОМЗЗ, основанных на использовании параметров электрических величин переходного процесса. Следует отметить, что для повышения точности дистанционного определения расстояния до места ОЗЗ, как правило, используются крутизна переднего фронта (начальное значение производ-

ной) переходного тока или напряжения поврежденной фазы [19, 20]. Анализ осциллограмм (рис. 4) показывает, что погрешности оценки данного параметра при использовании в расчетах модели КЛ с круглыми жилами заметно меньше (~5–10 %), чем погрешности оценки амплитуды или длительности первой полуволны разрядной составляющей переходного тока или напряжения (15–20 %).

Изложенное позволяет сделать вывод о достаточной для решения задач, связанных с расчетами переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, адекватности моделей КЛ с круглыми жилами реальным КЛ с секторными жилами.

Методика проведения вычислительных экспериментов на имитационных моделях в PSCAD. Для проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния частотной зависимости индуктивностей КЛ на погрешности расчетов переходных процессов при ОЗЗ использовались одновременно три имитационные модели кабельной сети 6 кВ в PSCAD (рис. 2), различающиеся моделями кабельной линии КЛ:

– модель 1 (эталонная) – с частотно-зависимой моделью КЛ1 (Frequency Dependent (Phase) Model);

– модель 2 – с частотно-независимой моделью КЛ1 (Bergeron Model), индуктивности прямой и нулевой последовательностей которых определены по (1) и (2);

– модель 3 – с частотно-независимой моделью КЛ1 (Bergeron Model), индуктивности прямой и нулевой последовательностей которых определены по справочным данным для частоты 50 Гц.

При испытаниях измерялись параметры разрядной и зарядной составляющих свободных колебаний переходного тока ОЗЗ и переходного напряжения на поврежденной фазе (амплитуда, частота, постоянная затухания, длительность (крутизна) переднего фронта) и оценивались погрешности моделей 2 и 3 по сравнению с эталонной моделью 1.

Результаты исследований влияния частотных характеристик КЛ на точность расчетов переходного процесса при ОЗЗ. На рис. 6–8 в качестве примера приведены осциллограммы переходного тока ОЗЗ (рис. 6), напряжения на поврежденной фазе (рис. 7) и напряжения нулевой последовательности (рис. 8), полученные при вычислительных экспериментах на моделях 1, 2 и 3.

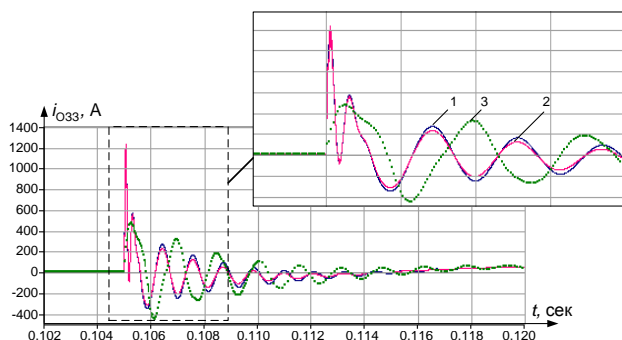


Рис. 6. Осциллограммы переходного тока в месте ОЗЗ: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

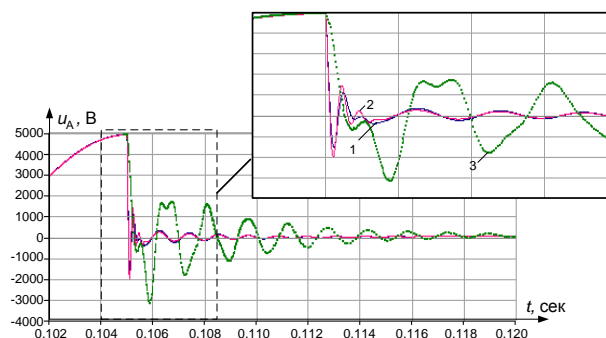


Рис. 7. Осциллограммы напряжения на поврежденной фазе сети: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

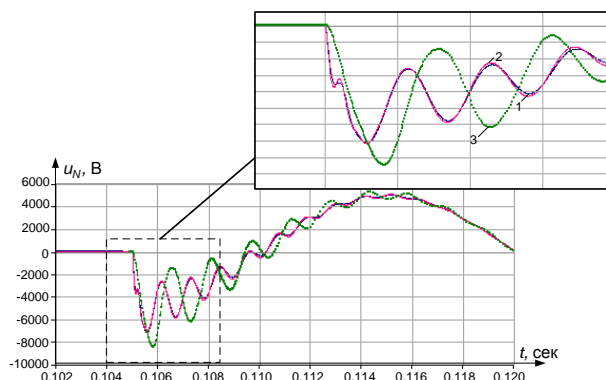


Рис. 8. Осциллограммы напряжения нулевой последовательности: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

При проведении вычислительных экспериментов варьировались суммарный емкостный ток сети $I_{\Sigma} = 5\text{--}30$ А и расстояние до места ОЗЗ от шин источника питания $l_3 = 0,1\text{--}5$ км. Приведенные на рис. 6–8 осциллограммы получены при следующих расчетных условиях: $I_{\Sigma} = 30$ А; $l_3 = 1$ км; пробой изоляции на максимуме напряжения поврежденной фазы ($\varphi_{\text{пр}} = 90^\circ$); переходное сопротивление в месте ОЗЗ $r_n = 0$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что модель 3, параметры КЛ которой определены на основе справочных данных и характеристик на частоте 50 Гц, неадекватна эталонной частотно-зависимой модели 1 в части таких параметров, как амплитуда, длительность и крутизна переднего фронта первой полуволны переходного тока, частота и время полного затухания разрядной составляющей. Погрешности в оценке указанных параметров разрядной стадии переходного тока при использовании модели 3 по сравнению с эталонной моделью могут достигать 70–80 % и более. В зарядной стадии переходного тока

амплитудная погрешность уменьшается, но сохраняется значительная угловая погрешность (например, рис. 6).

Значительные погрешности при использовании модели 3 возникают также при оценке параметров переходного напряжения поврежденной фазы (рис. 7) и напряжения нулевой последовательности (рис. 8), прежде всего таких, как максимальное значение, длительность и крутизна переднего фронта, которые используются в некоторых методах дистанционного определения места ОЗЗ по параметрам переходного процесса.

Изложенное позволяет сделать вывод, что применение для расчетов переходных процессов при ОЗЗ моделей кабельных сетей 6–10 кВ, в которых параметры КЛ определяются по справочным данным на частоте 50 Гц, может приводить к грубым ошибкам в оценке в расчетах переходных токов и напряжений.

Существенно более точные оценки параметров электрических величин переходного процесса позволяет получить модель 2, в которой параметры КЛ определены по скорости распространения электромагнитной волны в кабелях из соотношений (1) и (2). Погрешности модели при расчетах параметров разрядной стадии переходного процесса (амплитуда и длительность, крутизна переднего фронта первой полуволны тока), как правило, не превышают 15–20 % (например, рис. 6, 7). В зарядной стадии переходного процесса погрешности модели 2 не превышают 10 % (например, рис. 6–8). Поэтому модели, в которых параметры КЛ определены по скорости распространения электромагнитной волны в кабелях, могут применяться для приближенных расчетов переходных токов и напряжений при решении большинства задач, связанных с исследованиями переходных процессов при ОЗЗ.

Исключением является задача ДОМЗЗ по параметрам переходного процесса, актуальная, прежде всего, для распределительных кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения. Для решения указанной задачи в основном используются ток и напряжения разрядной стадии переходного процесса, параметры которых наиболее существенно зависят от удаленности места ОЗЗ от шин защищаемого объекта. Обеспечить требуемую для ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ точ-

ность расчетов параметров разрядных токов и напряжений, на наш взгляд, позволяет только применение частотно-зависимых моделей КЛ.

Выводы. Применение в расчетах переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ моделей кабельных ЛЭП, параметры которых определены на основе справочных данных при частоте 50 Гц, может приводить к грубым ошибкам в расчетах переходных токов и напряжений, прежде всего их разрядных составляющих.

Приемлемую для большинства задач точность расчетов переходных токов и напряжений как для разрядной, так и зарядной стадий переходного процесса при ОЗЗ позволяет обеспечить применение моделей кабельных ЛЭП, параметры которых определены по скорости распространения электромагнитных волн в каналах «фаз–фаза» и «фаза–земля» кабелей.

Обеспечить высокую точность расчетов параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, необходимую, прежде всего, для решения задачи дистанционного определения места повреждения при замыканиях на землю, должны модели кабельных ЛЭП, учитывающие зависимость их продольных параметров индуктивностей от частоты переходных токов.

Таким образом, применение разработанных рекомендаций по выбору параметров схем замещения и имитационных моделей трехфазных кабельных линий с бумажно-пропитанной изоляцией позволяет повысить точность и избежать грубых ошибок в расчетах переходных токов и напряжений при ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
3. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 268 с.
4. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки

различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33).

5. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.

6. **Сирота И.М., Масляник В.В.** Свободные емкостные токи замыкания на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю // Электричество. – 1977. – № 3. – С. 38–43.

7. **Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.** Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 264 с.

8. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.

9. **Цапенко Е.Ф.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.

10. **Дударев Л.Е., Зубков В.В.** Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6–35 кВ и использование их для средств релейной защиты // Электрические станции. – 1978. – № 6. – С. 68–71.

11. **Шуляк В.Г.** Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю // Известия вузов. Энергетика. – 1969. – № 1. – С. 1–6.

12. **Дьяконов В.П., Пеньков А.А.** MATLAB и SIMULINK в электроэнергетике. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.

13. **Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC** (Программный комплекс для моделирования энергосистем PSCAD/EMTDC) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/> [Дата обращения 20.07.21].

14. **Real-Time Digital Simulator (RTDS)** (Программно-технический комплекс цифрового моделирования в реальном масштабе времени) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/> [Дата обращения 20.07.21].

15. **ATPDesigner.** Design and Simulation of Electrical Power Networks [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html [Дата обращения 20.07.21].

16. **Сафонов Д.Г.** Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 98–102.

17. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения линии электропередачи импульсными методами. – М.: Энергия, 1968. – 215 с.

18. **COMSOL Multiphysics Reference Manual.** Справочное руководство COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf [Дата обращения 13.07.2021].

19. **Filatova G.A., Shadrikova T.Yu., Shuin V.A.** Comparison of electrical variables of transient process for earth-to ground fault location in medium voltage cable networks // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16–19 May 2017, St. Petersburg, Russia. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076243.

20. **Качесов В.Е.** Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением // Электричество. – 2005. – № 6. – С. 9–18.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Phase to earth faults in networks with isolated neutral point and with compensation of capacitive currents]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

2. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. *Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh* [Intermittent arc phase to earth faults in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

3. Halilov, F.H., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S., Podporkin, G.V., Tadzhibaev, A.I. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Over-voltage protection of 6–35 kV networks]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002. 268 p.

4. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit* [Phase to earth faults in 6–35 kV networks. Advantages and disadvantages of different protection devices]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, no. 3(33).

5. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Phase to earth fault protection devices in 6–10 kV power networks]. Moscow: NTF «Energoprogress», «Energetik», 2001. 104 p.

6. Sirota, I.M., Maslyanik, V.V. *Svobodnye emkostnye toki zamykaniya na zemlyu v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu* [Transient components of phase to earth fault capacitive currents in networks with low phase to earth fault currents]. *Elektrichestvo*, 1977, no. 3, pp. 38–43.

7. Sirota, I.M., Kislenco, S.N., Mikhaylov, A.M. *Rezhimy neytrali elektricheskikh setey* [Neutral point grounding modes of electrical power networks]. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 264 p.

8. Shuin, V.A. *Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsesssa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV* [Initial phase relations of transient mode electrical quantities during phase to earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.

9. Tsapenko, E.F. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV* [Phase to earth faults in 6–35 kV cable networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 128 p.
10. Dudarev, L.E., Zubkov, V.V. Nekotorye osobennosti perekhodnykh protsessov pri zamykanii fazy na zemlyu v setyakh 6–35 kV i ispol'zovanie ikh dlya sredstv releynoy zashchity [Some features of transient processes during phase to earth faults in 6–35 kV networks and their usage for relay protection devices]. *Elektricheskie stantsii*, 1978, no. 6, pp. 68–71.
11. Shulyak, V.G. Perekhodnye protsessy v setyakh s izolirovannoy neytral'yu pri zamykanii na zemlyu [Transient processes in networks with isolated neutral point during phase to earth faults]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1969, no. 1, pp. 1–6.
12. D'yakonov, V.P., Pen'kov, A.A. *MATLAB i SIMULINK v elektroenergetike* [MATLAB and SIMULINK in electrical engineering]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 816 p.
13. Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC. Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>
14. Real-Time Digital Simulator (RTDS). Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>.
15. ATPDesigner. Design and Simulation of Electrical Power Networks. Available at: http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html.
16. Safonov, D.G. Imitatsionnoe modelirovanie funktsionirovaniya raspreditel'noy seti s dugogasyashchim reaktorom [Simulation study of distribution power networks with arc suppression coils]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2018, no. 6(162), pp. 98–102.
17. Shalyt, G.M. *Opreделение mest povrezhdeniya linii elektroperedachi impul'snymi metodami* [Fault location in transmission lines with the usage of impulse methods]. Moscow: Energiya, 1968. 215 p.
18. COMSOL Multiphysics Reference Manual. Available at: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL>.
19. Filatova, G.A., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. Comparison of electrical variables of transient process for earth-to ground fault location in medium voltage cable networks. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16–19 May 2017*. Saint-Petersburg, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076243.
20. Kachesov, V.E. Metod opredeleniya zony odnofaznogo zamykaniya v raspreditel'nykh setyakh pod rabochim napryazheniem [A method of definition of phase to earth fault zone in distribution networks under operational voltage]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 6, pp. 9–18.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК [621.314.26+621.316.94+621.317.757]:621.311.1

Александр Аркадьевич Николаев

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

Ильдар Галиевич Гилемов

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

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

Оценка влияния режимов работы электроприводов прокатного стана с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети 10 кВ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современные электроприводы прокатных станов строятся на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями. Работа таких преобразователей оказывает негативное влияние на систему внутризаводского электроснабжения. В целях улучшения качества напряжения в активных выпрямителях применяют специальные алгоритмы широтно-импульсной модуляции. Как правило, все исследования влияния электроприводов с ПЧ-АВ на питающую сеть осуществляются на упрощенных математических моделях, не учитывающих возможные резонансные явления в системе электроснабжения и режимы работы электроприводов. В связи с этим целью работы является оценка допустимости такого подхода.

Материалы и методы. Тренды основных параметров электроприводов стана за цикл прокатки записаны с помощью программного обеспечения IBA PDA. Полученные зависимости аппроксимированы и использованы в комплексной имитационной модели системы внутризаводского электроснабжения с учетом параметров питающей сети, кабельных линий, понизительных трансформаторов, электроприводов стана и других электроприемников цеховых подстанций. Основным допущением при имитационном моделировании является учет нагрузок остальных электроприемников в виде постоянных величин.

Результаты. Проведено исследование влияния режимов работы электропривода прокатного стана на качество электроэнергии распределительной сети 10 кВ системы внутризаводского электроснабжения металлургического предприятия. Установлено, что коэффициент суммарных гармонических составляющих K_U на секциях 10 кВ главной понизительной подстанции металлургического предприятия изменяется нелинейным образом в динамических режимах разгона и торможения электроприводов, характер изменения коэффициента K_U также зависит от наличия резонансных явлений в частотной характеристике питающей сети среднего напряжения.

Выводы. Полученные результаты доказывают необходимость учета режимов работы электроприводов при исследовании влияния электроприводов с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети при проведении экспериментальных исследований на действующем оборудовании предприятий, а также при выполнении теоретических исследований на математических моделях. Адекватность имитационной модели ранее подтверждена экспериментальными данными и предыдущими исследованиями.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, резонанс токов, режим работы электропривода

Alexander Arkadyevich Nikolaev

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

Il'dar Galievich Gilemov

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

Mikhail Viktorovich Bulanov

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

Assessment of influence of rolling mill FC-AR electric drive operation mode on 10 kV supply network voltage quality

Abstract

Background. Advanced rolling mill electric drives are based on frequency converters (FC) with active rectifiers (AR). Operation of such converters has negative impact on the in-plant power supply system. To improve the voltage quality of active rectifiers, special algorithms of pulse-width modulation algorithms are used. As a rule, the study of the effect of electric drives with FC-AR on the supply network are carried out based on simplified mathematical models that do not consider possible resonance phenomena in the power supply system and operating mode of electric drives. Thus, the aim of the paper is to assess the acceptability of such an approach.

Materials and methods. The trends of the main parameters of the rolling mill electric drives have been recorded during the rolling cycle using the IBA PDA software. The obtained dependencies values have been approximated and applied in a complex simulation model of the in-plant power supply system. It considers the parameters of the supply network, cable lines, step-down transformers, rolling mill electric drives and other electrical receivers of the shop substations. The main assumption in simulation modeling is to consider the loads of other electrical receivers in the form of constant values.

Results. The authors have studied the effect of the operating modes of the rolling mill electric drive on the electric power quality in the 10 kV distribution network of the in-plant power supply system of a metallurgical enterprise. It is found that the total harmonic distortion K_U at 10 kV sections of the main step-down substation of a metallurgical enterprise is changing in a nonlinear manner in the dynamic modes of acceleration and deceleration of electric drives. The nature of the coefficient K_U also depends on the presence of resonance phenomena in the frequency response of the medium voltage supply network.

Conclusions. The obtained results prove the need to consider the operating modes of electric drives when studying the influence of electric drives with FC-AR on the quality of the supply network voltage. In case we conduct experimental research using the equipment of the enterprises, as well as during theoretical research using mathematical models. The adequacy of the simulation model has previously been confirmed by experimental data and previous studies.

Key words: electromagnetic compatibility, frequency converter, active rectifier, pulse width modulation, current resonance, electric drive operation mode

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.041-050

Введение. В последние десятилетия широкое применение в электроприводах станов горячей и холодной прокатки получили многоуровневые преобразователи частоты с активными выпрямителями

(ПЧ с АВ) [1–5]. Широкому использованию АВ в мощных электроприводах способствовал ряд их преимуществ перед диодными и тиристорными выпрямителями. Первым является возможность работы без потребле-

ния реактивной мощности и обеспечение рекуперации электрической энергии в питающую сеть в тормозных режимах электропривода [6, 7]. Вторым преимуществом является улучшение гармонического состава потребляемого тока в низкочастотном диапазоне за счет применения специальных алгоритмов ШИМ (ШИМ с удалением выделенных гармоник или ШИМ с подавлением выделенных гармоник) [2, 4, 8–11]. Однако практический опыт эксплуатации показал, что ПЧ с АВ не лишены недостатков. На ряде металлургических предприятий после внедрения ПЧ с АВ наблюдались проблемы [12, 13] с функционированием электрооборудования, выходы из строя преобразователей частоты, функционирующих параллельно мощным ПЧ с АВ главных электроприводов прокатного стана, аварийные отключения ПЧ с АВ при провалах и несимметрии напряжения питающей сети, ухудшение качества напряжения во внутризаводской распределительной сети.

Проблема, связанная с электромагнитной совместимостью мощных ПЧ с АВ с питающей сетью на одном металлургическом предприятии, рассмотрена в [5]. На данном предприятии после реконструкции четырехклетьевого стана холодной прокатки были введены в работу 5 мощных электроприводов клетей и натяжной моталки, построенные на базе трехуровневых ПЧ с АВ серии ACS6000 и синхронных двигателей. Исследования показали, что сильные искажения напряжения обусловлены взаимным влиянием емкостей кабельных линий и индуктивностей токоограничивающих реакторов на секциях главной понизительной подстанции (ГПП). Также было выявлено, что используемые алгоритмы ШИМ АВ не оптимальны. Были предложены новые таблицы углов переключения силовых ключей АВ. Таблицы были рассчитаны с учетом исключения из гармонического состава потребляемых преобразователями токов гармоник, попадающих в зону резонансов в частотной характеристике сети относительно секций главной понизительной подстанции. Имитационное моделирование показало значительный положительный технический эффект от предложенного алгоритма. Однако эти исследования проводились только для двух статических режимов работы ПЧ и не учитывали динамические режимы работы электропривода.

В работах, посвященных исследованию влияния ПЧ с АВ на качество напряжения питающей сети [14–18], как правило, представлены исследования только для статического режима работы электропривода. Динамические режимы работы электропривода не учитываются. Также при имитационном моделировании часто инвертер и синхронный или асинхронный двигатель упрощенно представляются в виде источника тока, эквивалентного номинальной нагрузке [4, 14, 18].

В связи с вышеизложенным возникла необходимость в проведении детальных исследований качества напряжения электрической сети внутризаводского электрообеспечения во всех режимах работы электроприводов прокатного стана.

Методы исследования. Установленные на четырехклетьевого стана холодной прокатки ПЧ фирмы ABB ACS6000 получают питание с секций распределительной подстанции (РП) (рис. 1). При этом реализованы два различных схемотехнических решения: электропривод клетки 1 и моталки выполнен по 6-пульсной схеме с использованием двухобмоточных трансформаторов мощностью 12 и 4,8 МВт соответственно, а клетей 2–4 – по 12-пульсной с использованием трехобмоточных трансформаторов мощностью по 12 МВт. Электроприводы клетей 1 и 3 получают питание с секции 1 РП, клетей 2, 4 и моталки – с секции 2. Секция 1 РП запитана от секции 2 главной понизительной подстанции ГПП (фидер 1) через токоограничивающий реактор. Секция 2 РП получает питание от секции 1 ГПП (фидер 21) также через токоограничивающий реактор.

На первом этапе работы [5] были проведены экспериментальные исследования качества напряжения в различных точках распределительной сети 10 кВ, а именно на секциях РУ-10 кВ ГПП и РП. На рис. 2 представлены измеренные мгновенные значения фазных и линейных напряжений на секциях ГПП и РП и их гармонический состав при работе клетей стана. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на секциях ГПП K_U при параллельной работе секций с питанием от одного понизительного трансформатора 110/10 кВ составляет 7,14 % (рис. 2,б). Значимыми гармониками являются гармоники с номерами 23, 29, 37.

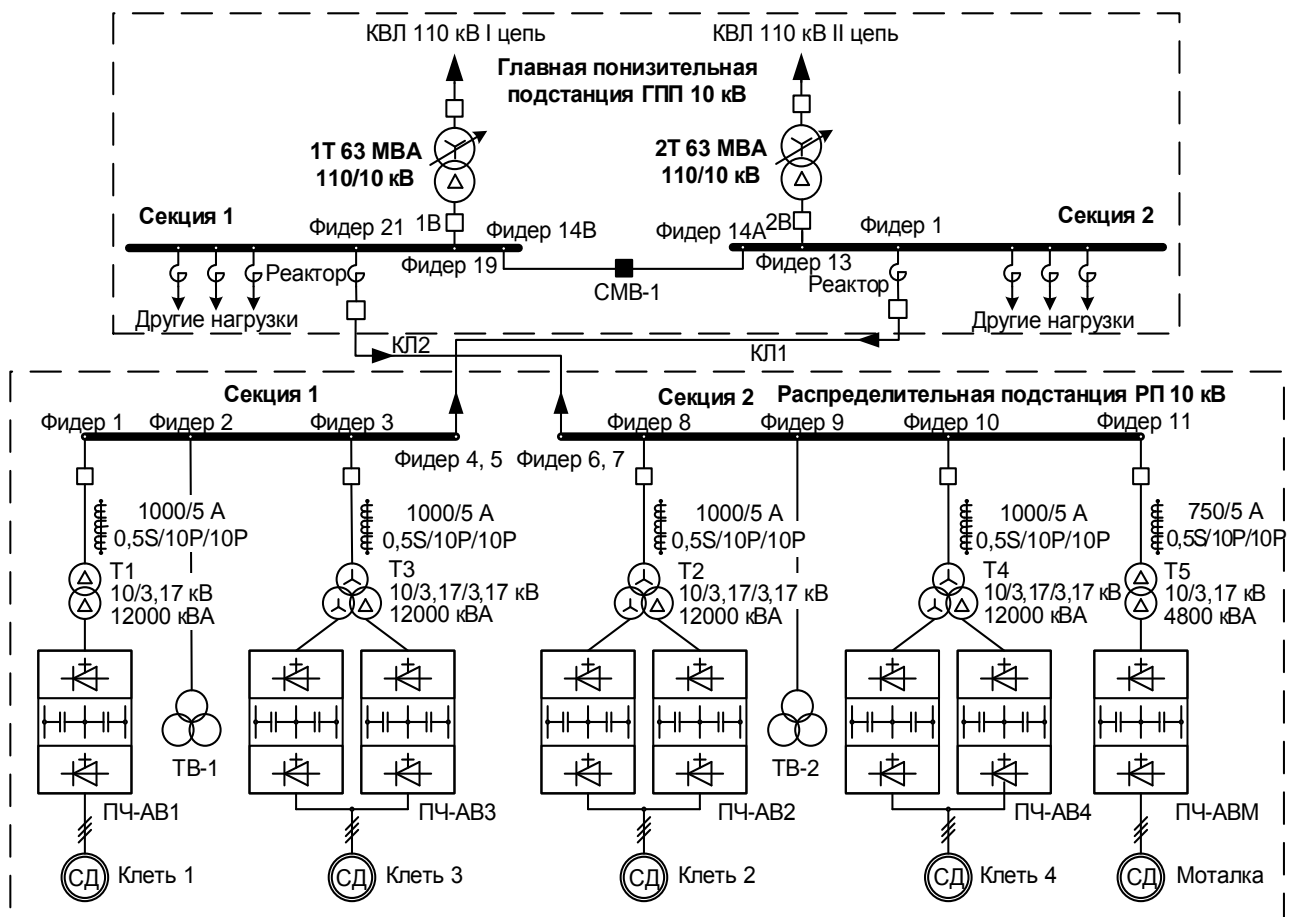


Рис. 1. Однолинейная схема распределительной подстанции, питающей электроприводы, на базе преобразователей частоты ABB серии ACS6000

Из-за использования токоограничивающих реакторов в ячейках РУ-10 кВ ГПП с индуктивными сопротивлениями $X_{P, \text{ФАЗ}} = 0,29\text{--}0,35$ Ом в частотных характеристиках относительно секций 1 и 2 ГПП, помимо основных резонансов в районе $f_{PE3} = 1450\text{--}2100$ Гц, присутствуют множественные резонансы. Эти резонансы вызваны взаимным влиянием токоограничивающих реакторов и суммарными емкостями кабелей отдельных фидеров ГПП. Так, при совместной работе секций ГПП с питанием от одного понижающего трансформатора 110/10 кВ 1Т или 2Т присутствуют дополнительные резонансы с частотами: 2650 Гц, 3150 Гц, 3650 Гц, 4050 Гц, 5150 Гц, 5750 Гц, 6350 Гц (рис. 2,б). Необходимо отметить, что амплитуды дополнительных резонансов в несколько раз ниже, чем у основных резонансных пиков в диапазоне $f_{PE3} = 1450\text{--}2100$ Гц. Это обуславливает незначительное усиление гармоник высокого порядка, генерируемых ПЧ с АВ в составе главных электроприводов четырехклетье-

вого стана холодной прокатки. Иная ситуация на секциях РУ-10 кВ РП.

При работе электроприводов стана на секции 1 РУ-10 кВ РП наблюдается сильное искажение линейных напряжений (рис. 2,в,г). Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U превышает 17 %. Доминирующими гармониками с амплитудой выше 4 % относительно первой гармоники являются: 11, 23, 107, 109, (рис. 2,г). Гармонический состав напряжения на секции 2 РП отличается в худшую сторону по сравнению с секцией 1. Значение K_U составляет 25,34 % (рис. 2,д,е). Помимо значимой 23-й гармоники, гармонические составляющие напряжения высокого порядка с максимальными амплитудами смещены вправо по шкале частот: $n = 121, 131, 133, 135$. Данный факт обусловлен смещением зоны резонанса в частотной характеристике в точке подключения электроприводов к секции 2 РУ-10 кВ РП с 4550–6550 Гц (91-я – 131-я гармоники) на 5450–7150 Гц (109-я – 143-я гармоники).

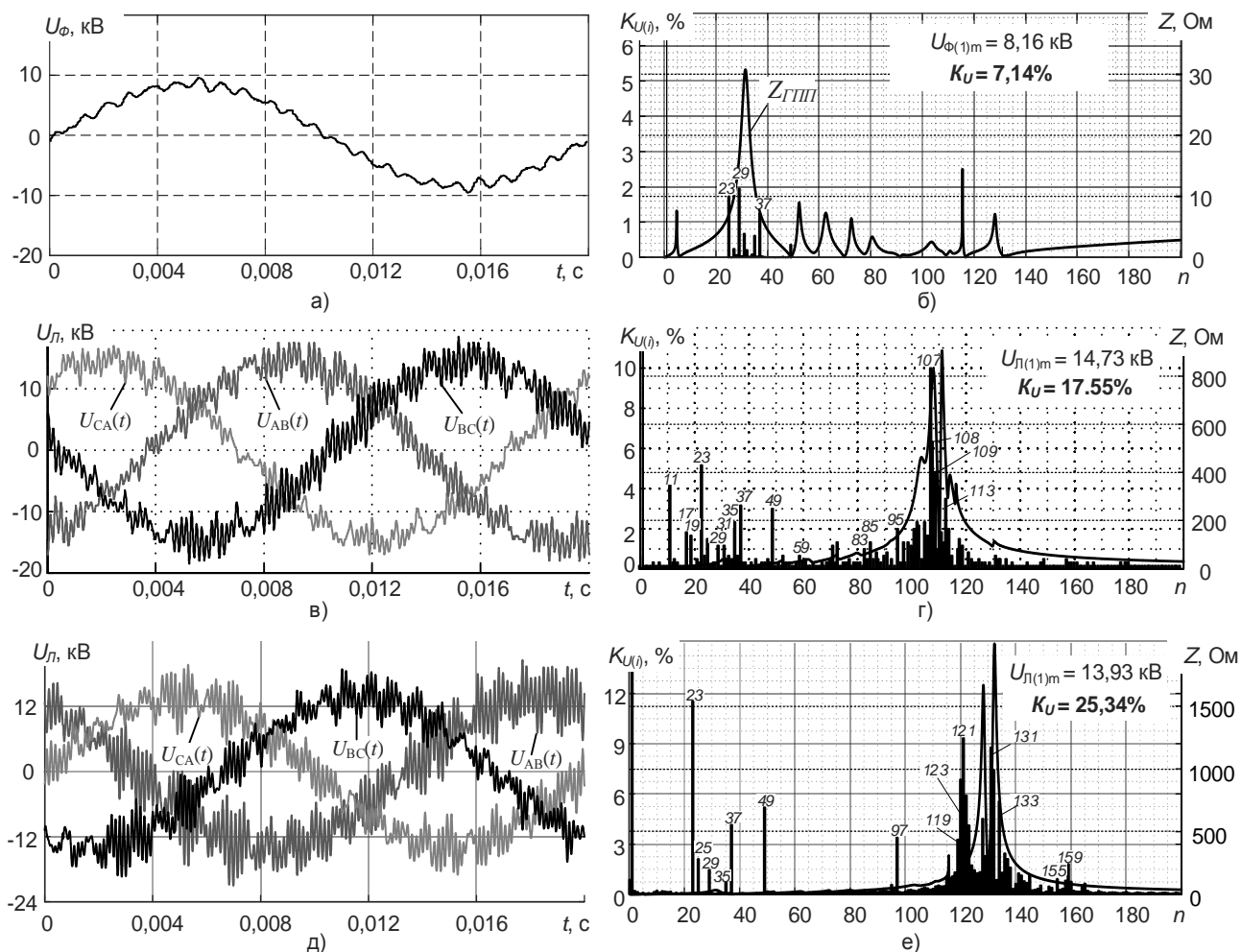


Рис. 2. Мгновенные значения напряжения, частотные характеристики и гармонический состав на шинах РУ-10 кВ: а, б – ГПП; в, г – секции 1 РП; д, е – секции 2 РП

Следует отметить, что характеристики $Z_{\text{СЕТИ}(f)}$ для секций 1 и 2 РУ-10 кВ РП значительно отличаются от частотной характеристики с множественными резонансами для секций РУ-10 кВ ГПП. Причиной этого является взаимное влияние емкостей кабельных линий, отходящих от фидеров 1 и 21 ГПП и индуктивностей токоограничивающих реакторов, расположенных в тех же ячейках. Характеристики $Z_{\text{СЕТИ}(f)}$ для секций 1 и 2 РП приведены на рис. 2,г,е. В характеристиках $Z_{\text{СЕТИ}(f)}$ присутствует одна область подъема импеданса сети, расположенная в широком диапазоне частот: для секции 1 – от 4550 Гц ($n = 91$) до 6550 Гц ($n = 131$) с максимумом около 5400 Гц ($n = 108$); для секции 2 – от 5450 Гц ($n = 109$) до 7150 Гц ($n = 143$) с двумя максимумами 6100 Гц ($n = 122$) и 6600 Гц ($n = 132$). Амплитуды резонансных пиков составляют от 800 до 2000 Ом. Это является причиной усиления незначительных по амплитуде

гармоник высокого порядка, генерируемых ПЧ с АВ, и сильного ухудшения качества напряжения на секциях РП.

С помощью программного обеспечения IBA PDA для проведения математического моделирования были записаны тренды основных параметров работы электроприводов стана (рис. 3), включающие величины угловых скоростей (рис. 3,а), моментов (рис. 3,б), выходных токов преобразователей (рис. 3,в), мощностей инверторов (рис. 3,г) и токов активных выпрямителей (рис. 3,д). Полученные зависимости были аппроксимированы и использованы в комплексной имитационной модели системы электроснабжения района ГПП с учетом параметров питающей сети 110 кВ, сетевых трансформаторов 110/10 кВ, всех кабельных линий 10 кВ от ГПП, электроприводов стана, электроприемников других цеховых РП и подстанций.

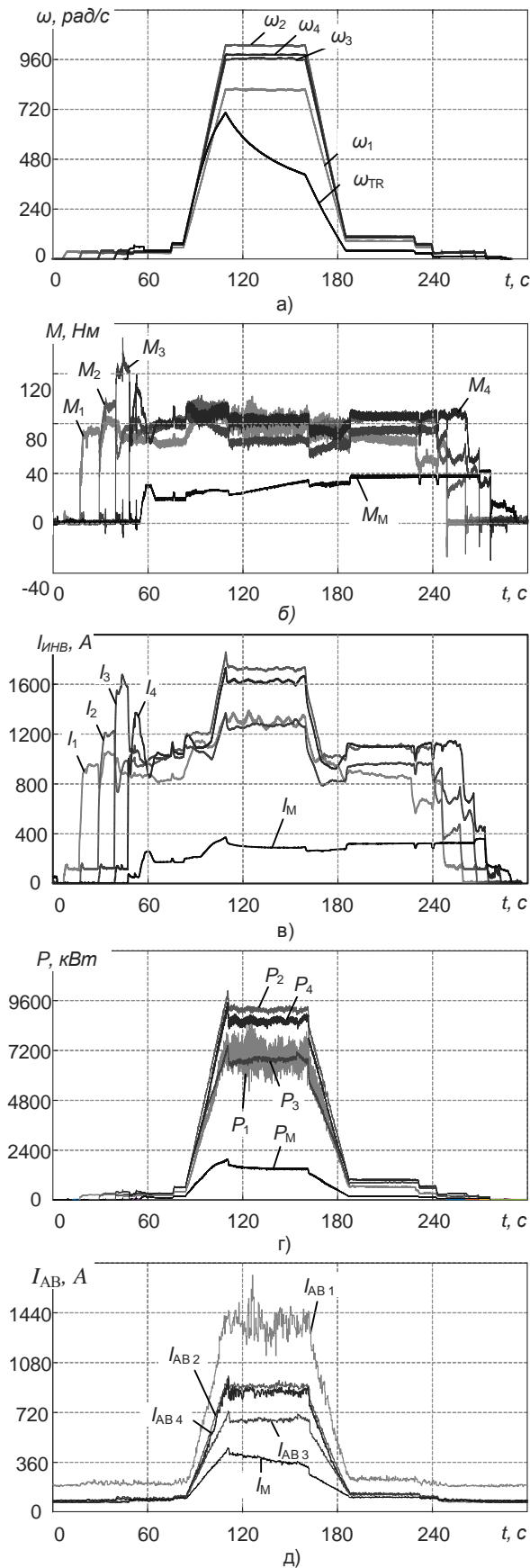


Рис. 3. Записанные мгновенные значения: а – угловых скоростей; б – моментов; в – токов инверторов; г – мощностей; д – токов АВ электроприводов прокатного стана

На имитационной модели в программной среде Matlab Simulink были получены величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U для секций 1 и 2 РУ-10 кВ главной понижающей подстанции ГПП при их совместной работе от 2Т (рис. 4,а) и секций 1 и 2 РУ-10 кВ распределительной подстанции РП (рис. 4,б,в), питающей главные электроприводы стана. При имитационном моделировании использовались как исходные алгоритмы ШИМ АВ, так и усовершенствованные, предложенные в [5].

Результаты исследования. Анализ полученных результатов показал следующее. Применение усовершенствованного алгоритма ШИМ позволяет снизить уровень K_U на шинах РУ-10 кВ секций 1 и 2 главной понижающей подстанции ГПП для всех режимов работы прокатного стана (рис. 4,а). В режиме заправки полосы в клетки стана, а также выхода полосы с клеток на низкой скорости электроприводов значение K_U составило в среднем 6,32 % для исходного алгоритма и 2,82 % для усовершенствованного. При прокатке значение K_U составило 6,37 и 2,91 % соответственно.

Минимальные значения K_U достигались во время разгона и торможения стана и составили 5,66 и 1,51 % соответственно. Максимальная величина K_U для исходного алгоритма была достигнута в момент перед торможением стана и составила 6,44 %, для усовершенствованного – сразу по завершению разгона и составила 3,00 %.

Иной характер изменения величины K_U наблюдается для напряжения на шинах секции 1 РУ-10 кВ РП (рис. 4,б), питающей электроприводы клетки 1 и 3. В режиме заправки полосы в клетки стана, а также выхода полосы с клеток на низкой скорости электроприводов значение K_U составило в среднем 12,54 % для исходного алгоритма и 11,63 % для усовершенствованного. После разгона электроприводов величина K_U заметно снижается до 11,89 и 9,07 % соответственно. При разгоне и торможении стана наблюдаются скачкообразные изменения величины K_U . Максимально значение K_U было достигнуто при начале разгона стана и составило 13,61 и 12,21 % соответственно. Минимум K_U был достигнут в конце разгона и составил 11,57 и 8,54 % соответственно.

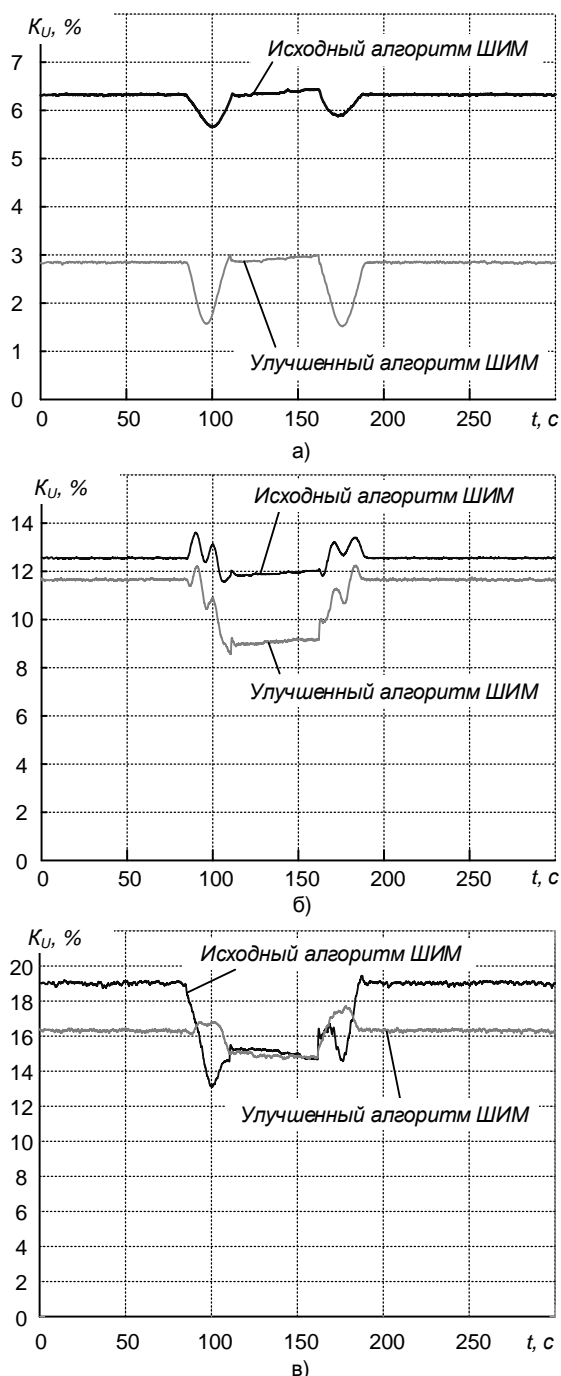


Рис. 4. Полученные на имитационной модели величины K_U для исходного и усовершенствованного алгоритмов ШИМ: а – для секций ГПП; б – для секции 1 РП; в – для секции 2 РП

Применение усовершенствованного алгоритма ШИМ АВ позволило снизить величину K_U на шинах секции 2 РУ-10 кВ РП (рис. 4,в) при заправочной скорости клетей стана с ~19,01 до 16,31 %. Однако при работе электроприводов стана на прокатной скорости эффект от применения усовершенствованных алгоритмов в АВ ПЧ клетей 2, 4 и моталки практически незначителен: в среднем 15,19 и 14,89 % соответственно. При использовании исходных ал-

горитмов ШИМ при разгоне стана величина K_U достигает минимума – в 13,12 %. При использовании усовершенствованных алгоритмов ШИМ при разгоне и торможении стана наблюдается рост величины K_U для рассматриваемой секции. Максимальная величина составила 17,73 %. Максимальная величина K_U при использовании исходных алгоритмов ШИМ была получена сразу по завершении торможения стана после прокатки полосы и составила 19,44 %. Минимальная величина K_U при использовании усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ была получена во время прокатки полосы на установившейся скорости и составила 14,69 %.

Для удобства анализа полученных результатов в таблицу сведены величины средних значений K_U при работе стана на заправочной скорости и установившейся скорости при прокатке, а также минимальные и максимальные величины K_U для секций РУ-10 кВ ГПП и секций 1 и 2 РУ-10 кВ РП.

Результаты исследований

Точка измерения	Описание	K_U , %	
		исходный алгоритм	усовершенствованный алгоритм
Секция 1 и 2 ГПП (параллельная работа от 2Т)	Заправочная скорость	6,32	2,82
	Скорость прокатки	6,37	2,91
	Минимальная величина	5,66	1,51
	Максимальная величина	6,44	3,00
Секция 1 РП	Заправочная скорость	12,54	11,63
	Скорость прокатки	11,89	9,07
	Минимальная величина	11,57	8,54
	Максимальная величина	13,61	12,21
Секция 2 РП	Заправочная скорость	19,01	16,31
	Скорость прокатки	15,19	14,89
	Минимальная величина	13,12	14,69
	Максимальная величина	19,44	17,73

Анализ полученных результатов показывает, что применение усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ позволяет добиться улучшения качества напряжения как на секциях распределительной подстанции РП, питающей электроприводы прокатного стана, так и на секциях главной понижающей подстанции ГПП системы внутризаводского электроснабжения, являющихся общей точкой для всех потребителей, что наиболее важно. Однако стоит отметить, что в единственном случае – для секции 2 РП – при применении исходных алгоритмов ШИМ в режиме разгона стана достигается минимум величины K_U , который составляет 13,12 %, что превосходит показатели усовершенствованного алгоритма (14,69 %). Но это единственный кратковременный момент (в сумме ~30 с) в цикле работы прокатного стана, когда исходные алгоритмы ШИМ АВ превосходят представленные усовершенствованные.

Выводы. По результатам проведенных исследований было показано значимое влияние режимов работы электропривода прокатного стана на качество электроэнергии распределительной сети 10 кВ системы внутризаводского электроснабжения металлургического предприятия. Исследования показали, что коэффициент K_U на секциях 10 кВ главной понижающей подстанции изменяется нелинейным образом в динамических режимах разгона и торможения электроприводов. Характер изменения коэффициента K_U также зависит от наличия резонансных явлений в частотной характеристике питающей сети среднего напряжения. Данное обстоятельство доказывает необходимость учета режимов работы электроприводов при исследовании влияния электроприводов с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети при проведении экспериментальных исследований на действующем оборудовании предприятий, а также при выполнении теоретических исследований на математических моделях.

При разработке усовершенствованных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей с функцией адаптации к резонансным явлениям в частотной характеристике питающей сети должна проводиться дополнительная проверка эффективности алгоритмов для всего цикла работы электроприводов.

Для рассматриваемой системы электроснабжения прокатного стана разрабо-

танные усовершенствованные алгоритмы ШИМ обеспечивают достижение значимого технического эффекта по уменьшению значения K_U как на секциях 10 кВ главной понижающей подстанции предприятия, так и на секциях цехового распределительного устройства, от которого получают питание мощные электроприводы прокатных клетей и моталки. Максимальная величина относительного изменения δK_U на секциях ГПП составила -55,4 %, при этом на секциях цехового РУ-10 кВ $\delta K_U = -23,7$ %.

Список литературы

1. **Retrofit** of a Hot Rolling Mill Plant With Three-Level Active Front End Drives / G.A. Orcajo, J.R. Diez, J.M.C. Rodriguez, et al. // IEEE Transactions on Industry Applications. – May-June 2018. – Vol. 54, no. 3. – P. 2964–2974. DOI: 10.1109/TIA.2018.2808159.

2. **Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С.** Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 48–53.

3. **Reactive** power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2017. – Vol. 8(4). – P. 1455–1466.

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

5. **Providing** Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). – 2021. – P. 1–8. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462264.

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

7. **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. – P. 557–562.

8. **Research** on hybrid SHEPWM based on different switching patterns / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov, et al. // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2019. – Vol. 10(4). – P. 1875–1884.

9. **Franquelo L.G., Nápoles J.** A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – December 2007. – Vol. 54, no. 6.

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

11. **Jing T., Maklakov A., Radionov A.** Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10kV Grid with Three-Level NPC Inverter // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia. – 2019. – P. 75–79. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915413.

12. **Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Antropova L.I.** Ways to ensure electromagnetic compatibility of powerful frequency converters in internal power supply systems of industrial enterprises in the presence of resonance phenomena // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. – 2019.

13. **Экспериментальные** исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.П. Храмшин и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 96–105. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105.

14. **Nikolaev A.A., Gilemov I.G.** Improvement of Power Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. – 2019. – No. 4(45). – P. 35–42. (In Russian). DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42.

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

16. **Harmonic** Analysis of Grid-tied Active Front End Inverters for the Frequency Range of 0–9 kHz in Distribution Networks: Addressing Future Regulations / H. Rathnayake, K.G. Khajeh, F. Zare, R. Sharma // 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 2019. – P. 446–451. DOI: 10.1109/ICIT.2019.8755015.

17. **Маклаков А.С., Радионов А.А.** Исследование векторной ШИМ с различными

таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 30–37.

18. **Ioffe I., Iunusov R., Kostylev A.** The Comparative Analysis of Processes in Active Front End (AFE) for Cases of Different Power Sources // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). – 2019. – P. 99–104. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915097.

References

1. Orcajo, G.A., Diez, J.R., Rodriguez, J.M.C., Norriella, J.G. Retrofit of a Hot Rolling Mill Plant With Three-Level Active Front End Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018 May-June, vol. 54, no. 3, pp. 2964–2974. DOI: 10.1109/TIA.2018.2808159.

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

3. Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R., Maklakov, A.S., Maklakova, E.A. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2017, vol. 8(4), pp. 1455–1466.

4. Maklakov, A.S. Imitatsionnoye modelirovaniye glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tololistovogo stana 5000 [Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 3, pp. 16–25.

5. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V., Kosmatov, V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill. 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), 2021, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462264.

6. Maklakov, A.S., Gasiyarov, V.R., Belyy, A.V. Energosberegayushchiy elektroprivod na baze dvukhzvennogo preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypryamitelem i avtonomnym invertorom napryazheniya [Energy-saving electric drive based on a two-link frequency converter with an active rectifier and an autonomous voltage inverter]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 23–30.

7. 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.

8. Jing, T., Maklakov, A., Radionov, A., Baskov, S., Kulmukhametova, A. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, vol. 10(4), pp. 1875–1884.

9. Franquelo, L.G., Nápoles, J. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007 December, vol. 54, no. 6.

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

11. Jing, T., Maklakov, A., Radionov, A. Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10kV Grid with Three-Level NPC Inverter. *2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia*, 2019, pp. 75–79. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915413.

12. Nikolaev, A.A., Bulanov, M.V., Antropova, L.I. Ways to ensure electromagnetic compatibility of powerful frequency converters in internal power supply systems of industrial enterprises in the presence of resonance phenomena. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, 2019.

13. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khramshin, T.R., Nikiforov, G., Mutallapova, F.F. Eksperimental'nye issledovaniya elektromagnitnoy sovmestimosti sovremennykh elektroprivodov v sisteme elektrosnabzheniya metallurgicheskogo predpriyatiya [Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric

drives in the power supply system of industrial enterprises]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–105.

14. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G. Improvement of Power Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2019, no. 4(45), pp. 35–42. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42.

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

16. Rathnayake, H., Khajeh, K.G., Zare, F., Sharma, R. Harmonic Analysis of Grid-tied Active Front End Inverters for the Frequency Range of 0–9 kHz in Distribution Networks: Addressing Future Regulations. *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2019, pp. 446–451. DOI: 10.1109/ICIT.2019.8755015.

17. Maklakov, A.S., Radionov, A.A. Issledovanie vektornoy ShIM s razlichnymi tablitsami pereklyucheniya silovykh klyuchey trekhurovnovogo preobrazovatelya [Study of SVPWM with Various Vector Selection Tables of Three Level Converter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30–37.

18. Ioffe, I., Iunusov, R., Kostylev, A. The Comparative Analysis of Processes in Active Front End (AFE) for Cases of Different Power Sources. *2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, 2019, pp. 99–104. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915097.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.321

Андрей Ильич Тихонов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Россия, Иваново, e-mail: aitispu@mail.ru

Вадим Евгеньевич Мизонов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, e-mail: mizonov46@mail.ru

Алексей Вадимович Стулов

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

Марина Сергеевна Фадеева

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», соискатель, Россия, Иваново, e-mail: fadееva-mc@yandex.ru

Моделирование тепловых процессов с использованием электрических схем замещения в цифровых двойниках технических устройств¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одно из перспективных направлений цифровизации экономики сегодня связывают с понятием цифровых двойников технических систем. Интерес представляют, в частности, цифровые двойники, которые строятся на основе имитационных моделей технических устройств, калибруемых по результатам экспериментальных исследований на реальном устройстве. Такие модели позволяют осуществлять превентивный анализ последствий эксплуатации данных устройств в различных режимах. При этом возникает проблема построения параметрически связанных моделей физических процессов различной природы, лежащих в основе принципов функционирования данных устройств. В настоящее время для этих целей используются пакеты имитационного моделирования, наиболее популярным из которых является MatLab Simulink. Однако не все подобные пакеты предоставляют средства для работы с цепными моделями всех интересующих пользователя физических процессов. В связи с этим актуальной является разработка способа построения цифровых двойников технических устройств с использованием моделей произвольных физических процессов (в частности, тепловых) на основе электрических схем замещения, что унифицирует задачу моделирования процессов на основе теории цепей.

¹ Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 20-48-370001 от 19.01.2021.

The project is carried out with financial support of Russian Foundation for Basic Research (RFBR), local contest of Ivanovo region № 20-48-370001 dated 19.01.2021.

Материалы и методы. При разработке способа построения цифровых двойников использовано явление изоморфизма уравнений физических процессов на основе теории цепей, построенной на основе теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Моделирование осуществлено в среде MatLab Simulink с использованием библиотеки моделирования физических процессов SimScape. При моделировании приняты допущения, типичные для теории цепей.

Результаты. Разработан способ построения имитационных моделей, основанный на использовании электрических схем замещения физических процессов произвольной природы. В отличие от существующих подходов, где метод аналогии используется главным образом для моделирования одного из процессов, интересующих исследователя, предлагается создавать единую связанную модель всех физических процессов, лежащих в основе функционирования данного класса устройств, что позволит снизить уровень требований к системам имитационного моделирования, ограничив запрашиваемый функционал этих систем лишь электрическими цепями.

Выводы. Предложенный способ может быть положен в основу создания цифровых двойников технических устройств, позволяющих имитировать их работу в произвольных режимах с учетом множества связанных факторов различной физической природы.

Ключевые слова: цифровые двойники, изоморфизм уравнений, теория цепей, обыкновенные дифференциальные уравнения, имитационные модели

Andrey Ilyich Tikhonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Physics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aitispu@mail.ru

Vadim Evgenievich Mizonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mizonov46@mail.ru

Aleksey Vadimovich Stulov

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

Marina Sergeevna Fadeeva

Ivanovo State Power Engineering University, External Post graduate student, Russia, Ivanovo, e-mail: fadeeva-mc@yandex.ru

Modeling thermal processes using electrical equivalent circuits in digital twins of technical devices

Abstract

Background. One of the promising areas of digitalization of the economy today is associated with the concept of digital twins of technical systems. Digital twins based on simulation models of technical devices, which are calibrated according to the results of experimental studies on a real-time device are of great interest. Such models allow us to conduct preventive analysis of the operation consequences of these devices in various modes. Thus, a problem occurs to develop parametrically coupled models of physical processes of various natures that underlie the principles of operation of these devices. Currently, for these purposes, simulation software packages are used. MatLab Simulink software is the most popular one. However, not all such software packages provide tools to work with chain models of all physical processes that are of the user interest. Thus, the purpose of this article is to develop methods to construct digital twins of technical devices using models of arbitrary physical processes (in particular, thermal) based on electrical equivalent circuits. It unifies the task of modeling processes based on circuit theory.

Materials and methods. To develop the method to construct digital twins, the authors have applied the phenomenon of isomorphism of equations of physical processes based on the theory of circuits that is based on the theory of ordinary differential equations. The simulation has been carried out in the MatLab Simulink environment using the SimScape library for modeling physical processes. Assumptions typical for circuit theory are made during simulation.

Results. A method has been developed to construct simulation models based on the use of electrical equivalent circuits of physical processes of an arbitrary nature. In contrast to existing approaches, where the analogy method is used to simulate one of the processes of the researcher interest, it is proposed to develop a single integrated model of all physical processes underlying the operation of this class of devices. It will re-

duce the level of requirements for simulation systems by limiting the requested functionality of these systems to electrical circuits only.

Conclusions. The proposed method can be used as the basis for the development of digital twins of technical devices that allow simulating their operation in arbitrary modes, considering a variety of related factors of different physical nature.

Key words: digital twins, isomorphism of equations, circuit theory, ordinary differential equations, simulation models

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.051-059

Введение. Одним из наиболее замечательных качеств природных процессов является изоморфизм, суть которого состоит в том, что разные по природе явления могут быть описаны одинаковыми по форме уравнениями. Модели, построенные на основе изоморфизма уравнений, получили название аналогий [1, 2]. Надо отметить, что метод аналогий играл и продолжает играть большую роль в развитии физики [3, 4] и техники [5, 6].

Наиболее характерным примером в этом смысле является математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), описывающий переходные процессы произвольной природы, даже если эти процессы относятся к живым или даже идеальным системам (например, популяционные волны в экосистемах). Это позволяет, в частности, использовать данный аппарат, например, в теории автоматического управления, полностью абстрагируясь от принципов функционирования конкретных объектов управления.

Наиболее полно и детально использование аппарата ОДУ отработано в теории электрических цепей. Поэтому модели физических процессов, основанные на математическом аппарате ОДУ, часто называют цепными моделями. При этом имеет смысл говорить о тепловых, гидравлических, пневматических, механических, магнитных цепях и т.п. – любой физический процесс в произвольной технической системе может быть описан в терминах и с использованием аппарата теории цепей.

Одним из наиболее популярных пакетов, используемых для компьютерной имитации физических цепей, является MatLab Simulink, предоставляющий пользователям богатый набор библиотек для решения конкретных прикладных задач практически из любой области инженерных наук. В частности, для моделирования физических процессов на основе теории цепей в пакете Simulink используется библиотека SimScape, в со-

став которой входят узкоспециализированные библиотеки моделирования процессов в терминах конкретной области физики (электричество, термодинамика, гидравлика и т.п.) [7].

Существуют также и бесплатные аналоги пакета MatLab Simulink, например SciLab Xcos [8]. Данный пакет также позволяет имитировать работу цепей, но только электрических. И этого вполне достаточно для расчета процессов произвольной природы, так как благодаря упомянутому изоморфизму можно построить электрическую схему замещения любого физического процесса [9], в том числе термодинамического [10]. А так как теория электрических цепей оказывается наиболее отработанной, то зачастую более рационально использовать именно электрические схемы замещения, чем решать задачи в терминах конкретных физических цепей.

Особенно полезно знать об этом специалистам в области электротехники, которым в силу специфики функционирования электротехнических устройств приходится решать задачи теплообмена, вентиляции, гидравлики и т.п. в условиях дефицита знаний и опыта в данных разделах физики. При этом теорию электрических цепей данные специалисты, как правило, знают очень хорошо. Полезно это и специалистам из других областей техники, например теплотехникам, так как использование мощного аппарата электрических цепей при моделировании тепловых систем зачастую позволяет существенно облегчить формализацию и решение задач. В случаях, когда техническая система функционирует на основе комбинации множества процессов различной природы, аппарат моделирования этих процессов на основе электрических схем замещения оказывается незаменимым.

Рассмотрим конкретный пример моделирования с использованием электрических схем замещения процессов теплопередачи в таких технических устройствах,

как электрические машины и трансформаторы. Будем использовать для этого популярную библиотеку моделирования электрических цепей MatLab SimScape SimPowerSystem.

Методы исследования. Как известно, процесс теплопроводности в твердых телах описывается законом Фурье

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T, \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток; λ – удельная теплопроводность; T – температура; $\vec{\nabla}$ – дифференциальный оператор (набла):

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}. \quad (2)$$

Для частного случая одномерной теплопроводности получаем

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \approx \lambda \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = \lambda \frac{\Theta}{\Delta x}, \quad (3)$$

где Θ – перепад температур.

Данное выражение можно привести к виду

$$Q = qS = \Theta \frac{\lambda S}{\Delta x} = \frac{\Theta}{R_T}, \quad (4)$$

аналогичному виду закона Ома для электрической цепи:

$$Q = \frac{\Theta}{R_T}, \quad (5)$$

где Q – тепловой поток; S – площадь, через которую проходит тепловой поток; R_T – тепловое сопротивление теплопроводности, которое вычисляется по формуле

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta x}{S}, \quad (6)$$

аналогичной формуле для расчета электрического сопротивления:

$$R_{\Omega} = \rho \frac{\ell_n}{S_n} = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell_n}{S_n}, \quad (7)$$

где ρ и σ – удельное электрическое сопротивление и удельная электропроводность проводника соответственно; ℓ_n и S_n – длина и сечение проводника соответственно.

Процесс конвективного теплообмена с охлаждающей средой описывается законом Ньютона–Рихмана:

$$q = \frac{Q}{S} = \alpha(T_n - T_c) = \alpha \cdot \Theta, \quad (8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи поверхности; Θ – превышение температуры охлаждаемой поверхности T_n над температурой охлаждающей среды T_c .

Выражение (8) также приводится к виду (5), аналогичному закону Ома:

$$Q = qS = \alpha S \Theta = \frac{\Theta}{R_T}. \quad (9)$$

Тепловое сопротивление теплоотдачи при этом вычисляется по формуле

$$R_T = \frac{1}{\alpha S} \quad R_T = \frac{1}{\alpha S}, \quad (10)$$

что аналогично электрическому сопротивлению растекания электрического тока.

Для моделирования тепловых процессов во времени используем уравнение остывания/нагрева однородного тела:

$$Q dt = cm d\Theta + \alpha S \Theta dt, \quad (11)$$

где t – время; c – удельная теплоемкость; m – масса.

Представим данное уравнение в виде

$$d\Theta = \frac{1}{cm} (Q - \alpha S \Theta) dt \quad (12)$$

или

$$d\Theta = \frac{1}{C_m} \left(Q - \frac{\Theta}{R_m} \right) dt, \quad (13)$$

где $C_T = cm$ – теплоемкость однородного тела.

Это уравнение совпадает по форме с уравнением электрической цепи, представленной на рис. 1:

$$dU = \frac{1}{C} \left(I - \frac{U}{R} \right) dt, \quad (14)$$

где U – напряжение на элементах схемы; C – электроемкость конденсатора; I – источник тока; R – электрическое сопротивление.

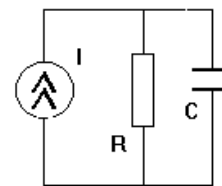


Рис. 1. Электрическая схема замещения участка тепловой цепи

В соответствии с первой теоремой подобия, два явления, описываемые изоморфными уравнениями, могут быть подобными при выполнении определенных условий, которые называются условиями подобия и представляют собой построенную по определенным правилам систему алгебраических уравнений, в которую входят величины, называемые масштабами подобия [11, 12].

Следует отметить, что условия подобия автоматически соблюдаются, если все масштабы подобия принять равными единице. При моделировании тепловых процессов с использованием реальных электрических цепей выполнение такого требования возможно лишь в немногих частных случаях, так как это может потребовать наличия элементов (конденсаторов, резисторов, источников тока) с нереализуемыми номиналами (например, конденсаторов емкостью в несколько фарад или сотен фарад). Однако при моделировании с использованием симуляторов типа MatLab Simulink данная проблема решается без особых трудностей (не считая случаев, когда построенная электрическая цепь предполагает возникновение большой численной погрешности при интегрировании итоговой ОДУ по времени).

В качестве примера рассмотрим простейшую тепловую цепь [13], с помощью которой моделируются тепловые процессы в однофазном трансформаторе малой мощности (рис. 2).

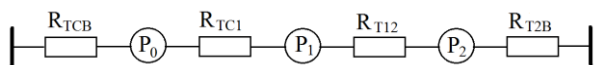


Рис. 2. Упрощенная тепловая цепь однофазного трансформатора

Здесь P_0 – источник теплотер в железном сердечнике (потери холостого хода); P_1 и P_2 – электрические потери в первичной и вторичной обмотках соответственно; R_{TCB} – тепловое сопротивление теплоотдачи с поверхности сердечника к окружающему воздуху; R_{TC1} – тепловое сопротивление теплопроводности от сердечника к первичной обмотке через изоляцию; R_{T12} – тепловое сопротивление теплопроводности от первичной обмотки к вторичной через изоляцию; R_{T2B} – тепловое сопротивление теплоотдачи с поверхности вторичной обмотки к окружающему воздуху. В первом приближении считаем, что железный сердечник и медные обмотки обладают нулевым тепловым сопротивлением.

Электрическая схема замещения данной тепловой цепи с учетом рис. 1 имеет вид, представленный на рис. 3.

При переходе от тепловой цепи, представленной на рис. 2, к электрической схеме замещения, представленной на рис. 3, тепловые сопротивления заменяются электрическими без изменения топологии цепи. При этом номиналы электрических сопро-

тивлений численно равны номиналам соответствующих электрических сопротивлений. Вместо источников теплового потока в эквивалентной электрической цепи ставится узел, в который входит ветвь от источника тока с тем же численным значением номинала, что и у источника теплотер. При этом свободный вывод источника тока заземляется. К узлам, соответствующим массивным элементам с заданной теплоемкостью присоединяются конденсаторы с электроемкостями, численно равными соответствующим теплоемкостям.

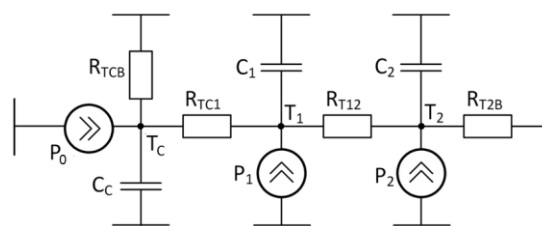


Рис. 3. Электрическая схема замещения упрощенной тепловой цепи однофазного трансформатора

Модель однофазного трансформатора, созданная в среде MatLab Simulink, которая может быть использована в качестве его цифрового двойника, приведена на рис. 4.

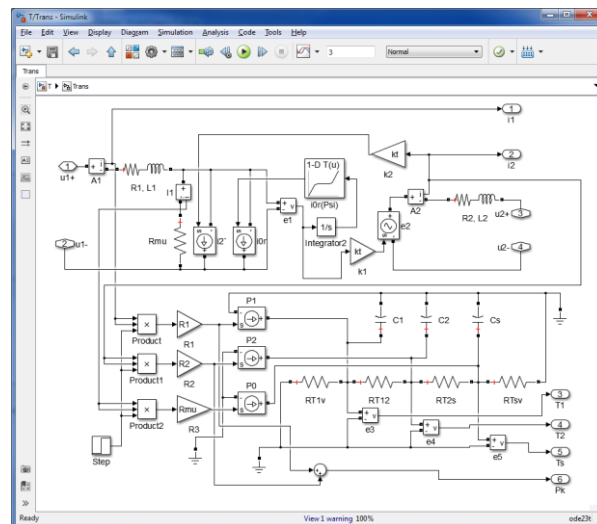


Рис. 4. Модель однофазного трансформатора с возможностью расчета тепловых процессов

Верхняя часть модели (рис. 4) соответствует физике процессов электромагнитного преобразования энергии в однофазном трансформаторе. Мгновенные значения токов в обмотках и ветви намагничивания используются для расчета соответствующих теплотер. Данные численные значения поставляются в качестве номиналов управляемых источников тока, ими-

тирующих источники тепла в электрической схеме замещения тепловых процессов, представленной в нижней части рис. 4.

Так как тепловые процессы в трансформаторе обладают существенно большей инерцией, чем электромагнитные, емкости, соответствующие теплоемкостям тепловой цепи, искусственно завышены с 10000 раз, что соответствует масштабированию переходного процесса в тепловой цепи по оси времени. Так, на рис. 5 приведен результат расчета нагрева трансформатора при включении его на нагрузку из холодного состояния. Анализ результатов показывает, что переходные процессы полностью затухают примерно через 3 с, что с учетом масштаба по времени соответствует 30000 с.

Результаты исследований. В качестве результатов исследования рассмотрим модель машины постоянного тока, которая может быть использована в качестве ее цифрового двойника, позволяющего симитировать с большой точностью как процессы электромеханического преобразования энергии, так и процессы нагрева и охлаждения. Особенно полезна данная модель при принятии решений, касающихся возможности эксплуатации данной машины в различных режимах с изначально неясными последствиями, например для анализа теплового состояния машины при

работе с перегрузками в повторно-кратковременном режиме.

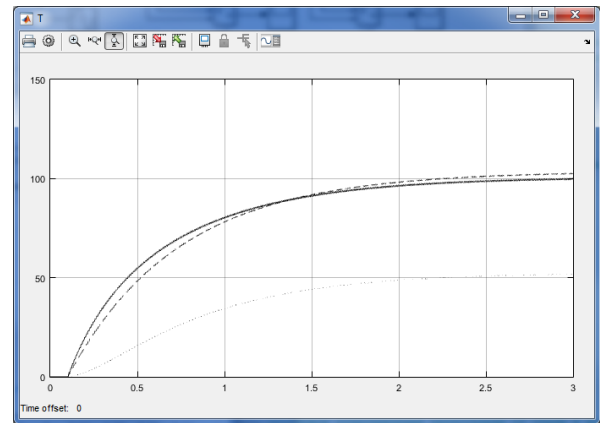


Рис. 5. Кривые изменения во времени температуры первичной и вторичной обмоток трансформатора в масштабе времени 1:10000

Имитационная модель машины приведена на рис. 6. Для моделирования электрической цепи машины здесь использована библиотека SimPowerSystem, входящая в состав MatLab Simulink SimScope. Для моделирования механических процессов используются (по выбору) две библиотеки: SimScope – Foundation Library – Mechanical и SimScope SimMechanics. Для моделирования тепловых процессов в статоре и якоре используется библиотека SimScope – Foundation Library – Thermal.

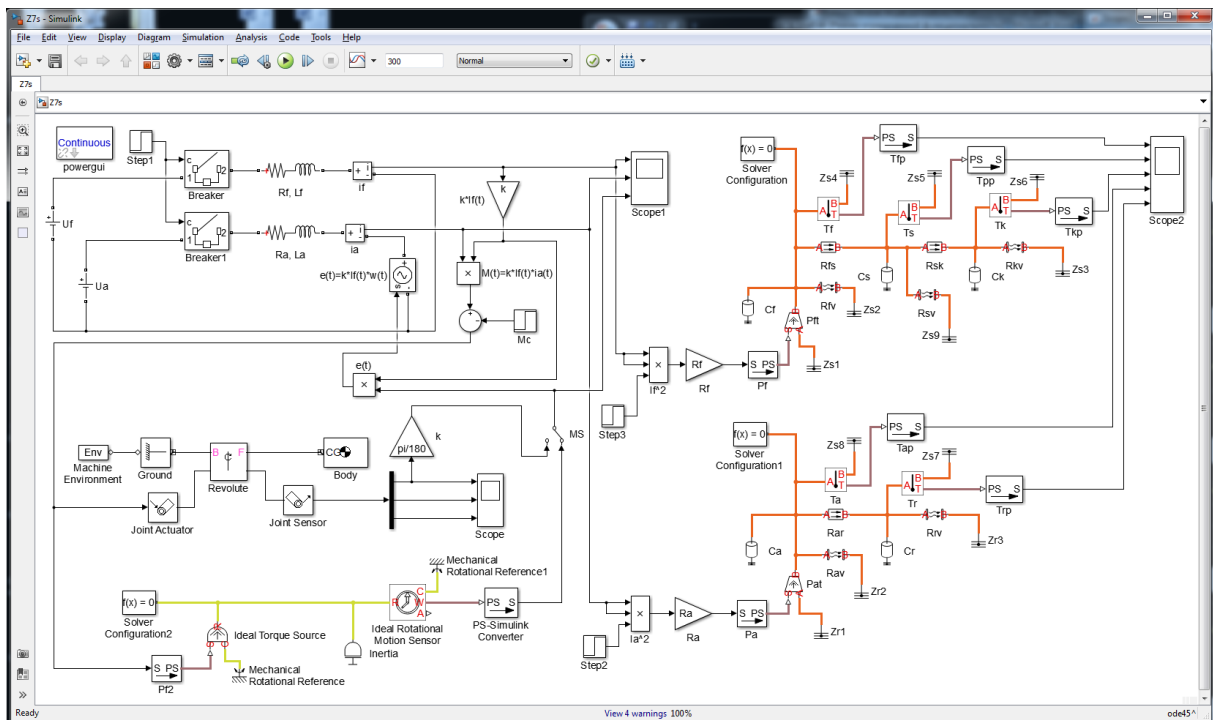


Рис. 6. Имитационная модель электромагнитных, механических и тепловых процессов в машине постоянного тока в MatLab Simulink SimScope

Математические вычисления осуществляются с использованием аппарата структурных схем, являющегося базовым функционалом Simulink. Все библиотеки связаны друг с другом в рамках единой модели с помощью интерфейсных блоков-конверторов PS_S и S_PS.

Как отмечалось, данный подход, основанный на использовании моделей, формализуемых в терминах конкретных технических дисциплин, возможен в рамках пакета MatLab Simulink, но при использовании других популярных и менее дорогостоящих пакетов имитации цепей более целесообразно использовать электрические схемы замещения различных физических процессов.

Так, на рис. 7 приведена электрическая схема замещения машины постоянного тока, построенная на основе схемы, приведенной на рис. 6. Здесь электрической цепью представлена не только тепловая часть модели (правая часть схемы), но и механическая цепь (нижняя левая часть схемы), представленная активным сопротивлением R_m , которое соответствует вязкому трению (вентиляторная нагрузка), и индуктивностью J , которая соответствует моменту инерции на валу. Момент внешней нагрузки на валу представлен математическим блоком M_n .

Обе модели (рис. 6 и рис. 7) дают один и тот же результат, представленный на рис. 8 и 9.

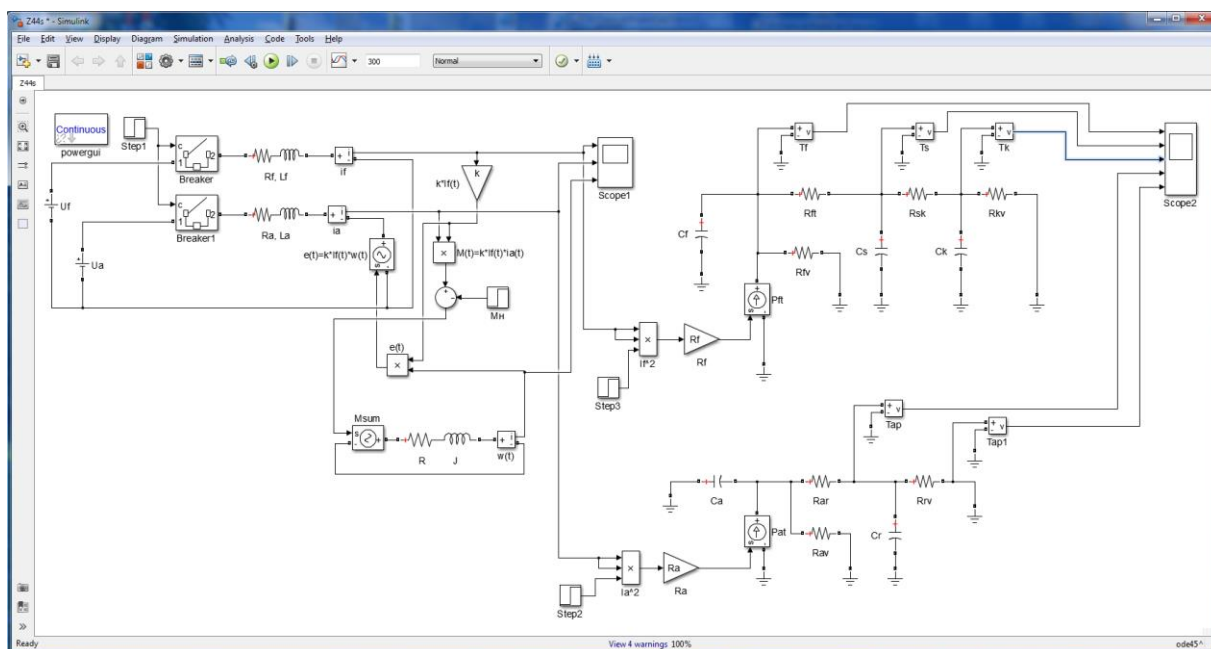


Рис. 7. Имитационная модель электромагнитных, механических и тепловых процессов в машине постоянного тока в MatLab Simulink SimPowerSystem

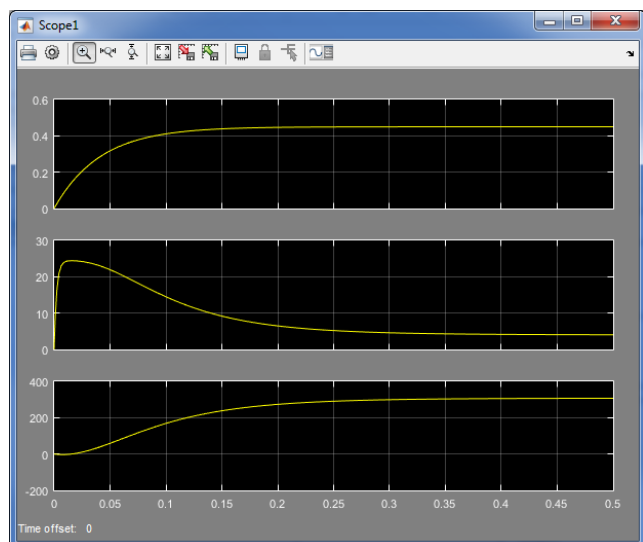


Рис. 8. Результат расчета электромеханической части модели: ток возбуждения, ток якоря, частота вращения якоря (масштаб по времени (горизонтальная ось) 1:1)

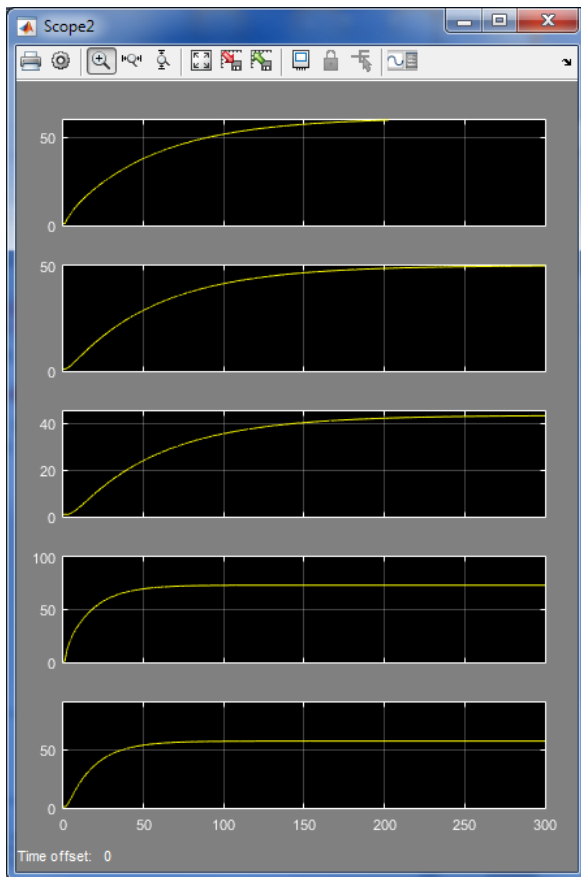


Рис. 9. Результат расчета температур различных узлов машины: обмотки статора, железа статора, корпуса, обмотки якоря, железа якоря (масштаб по времени 1:60)

Использование сложных разветвленных электрических схем замещения позволяет существенно повысить детальность моделируемых тепловых цепей, приблизив их по точности к полевым моделям, сохранив при этом главное достоинство цепных моделей – быстродействие. Так, в [14] приведены результаты исследований возможности построения детальной схемы замещения обмоток силового трансформатора, позволяющей получить картину распределения температуры по высоте обмотки, определив таким образом наиболее нагретую точку обмотки. Комбинация таких моделей с приведенным выше аппаратом имитационного моделирования позволит выйти на новый уровень развития технологии цифровых двойников, включив в него, например, методы диагностики.

Выводы. Использованный при разработке способа построения имитационных моделей метод аналогий основан на явлении изоморфизма обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих переходные физические процессы произ-

вольной природы. Использование при моделировании электрических схем замещения физических процессов позволяет снизить уровень требований к системам имитационного моделирования, ограничив запрашиваемый функционал этих систем лишь электрическими цепями, с помощью которых предлагается создавать модели всех интересующих исследователя физических процессов, лежащих в основе принципа функционирования данного класса устройств.

Предложенный способ может быть положен в основу создания цифровых двойников технических устройств, позволяющих имитировать их работу в произвольных режимах с учетом множества связанных факторов различной физической природы. При моделировании приняты допущения, типичные для теории цепей.

Список литературы

1. **Олсон Г.** Динамические аналогии / пер. с англ. Б.Л. Коробочкина; под ред. М.А. Айзермана. – М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1944. – 223 с.
2. **Костюченко Р.Ю.** Аналогии в науке и обучении // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. – 2017. – № 4(24). – С. 136–142.
3. **Попков В.И.** Роль аналогии в развитии физики // Актуальная наука. Физико-математические науки. – 2017. – № 1. – С. 6–13.
4. **Эйшинский Е.Р.** О методе аналогий в изучении физики // Актуальные вопросы науки, техники и образования в атомной отрасли: труды XI региональной науч.-практ. конф. – Новоуральск: Изд-во НТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 210–215.
5. **К вопросу** теоретического моделирования методом электрических аналогий гидравлических систем / О.Е. Волков, В.А. Корнев, Р.И. Кюннап, А.А. Колесников // Наука, техника и образование. – 2015. – № 8(14) – С. 15–19.
6. **Микитянский В.В., Хеввер Р.** Целесообразность применения метода электромеханических аналогий при исследовании динамики механизмов // Вестник АГТУ. – 2006. – № 2(3). – С. 44–50.
7. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
8. **Решение** инженерных задач в среде Scilab / А.Б. Андриевский, Б.Р. Андриевский, А.А. Капитонов, А.Л. Фрадков. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 97 с.
9. **Певчев В.П.** Составление электрических схем замещения электротехнических

систем на основе метода аналогий. – Тольятти: ТГУ, 2010. – 87 с.

10. **Коздоба Л.А.** Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.

11. **Веников В.А.** Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебник для вузов по спец. «Кибернетика электрических систем». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.

12. **Тихонов А.И.** Основы теории подобия и моделирования: учеб. пособие / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2-е изд. доп. и перераб. – Иваново, 2016. – 116 с.

13. **Киш Л.** Нагрев и охлаждение трансформаторов: пер. с венг. / под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.

14. **Стулов А.В., Тихонов А.И., Корнев И.А.** Разработка многоуровневой подсистемы тепловых расчетов САПР активной части распределительных трансформаторов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 96 с.

References

1. Olson, G. *Dinamicheskie analogii* [Dynamic analogies]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1944. 223 p.

2. Kostyuchenko, R.Yu. Analogii v nauke i obuchenii [Analogies in Science and Education]. *Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologiy*, 2017, no. 4(24), pp. 136–142.

3. Popkov, V.I. Rol' analogii v razvitiy fiziki [The role of analogy in the development of physics]. *Aktual'naya nauka. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2017, no. 1, pp. 6–13.

4. Eyshinskiy, E.R. O metode analogiy v izuchenii fiziki [On the method of analogies in the study of physics]. *Trudy XI regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy nauki, tekhniki i obrazovaniya v atomnoy otrasli»* [Proceedings of the XI Regional Scientific and Practical Conference “Topical Issues of Science, Technology and Education in the Nuclear Industry”]. Novoural'sk: Izdatel'stvo NTI NIYaU MIFI, 2017, pp. 210–215.

5. Volkov, O.E., Kornev, V.A., Kyunnap, R.I., Kolesnikov, A.A. K voprosu teoreticheskogo

modelirovaniya metodom elektricheskikh analogiy gidravlicheskikh sistem [On the issue of theoretical modeling by the method of electrical analogies of hydraulic systems]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2015, no. 8(14), pp. 15–19.

6. Mikityanskiy, V.V., Khever, R. Tselesoobraznost' primeneniya metoda elektromekhanicheskikh analogiy pri issledovanii dinamiki mekhanizmov [Feasibility of using the method of electromechanical analogies in the study of the dynamics of mechanisms]. *Vestnik AGTU*, 2006, no. 2(3), pp. 44–50.

7. Chernykh, I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMC Press; Saint-Petersburg: Peter, 2008. 288 p.

8. Andrievskiy, A.B., Andrievskiy, B.R., Kapitonov, A.A., Fradkov, A.L. *Reshenie inzhenernykh zadach v srede Scilab* [Solving engineering problems in the Scilab environment]. Saint-Petersburg: NIU ITMO, 2013. 97 p.

9. Pevchev, V.P. *Sostavleniye elektricheskikh skhem zameshcheniya elektrotekhnicheskikh sistem na osnove metoda analogiy* [Drawing up electrical equivalent circuits for electrical systems based on the analogy method]. Tol'yatti: TGU, 2010. 87 p.

10. Kozdoba, L.A. *Elektricheskoe modelirovaniye yavleniy teplo- i massoperenosa* [Electrical modeling of heat and mass transfer phenomena]. Moscow: Energiya, 1972. 296 p.

11. Venikov, V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki)* [Theory of similarity and modeling (in relation to the problems of the electric power industry)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1984. 439 p.

12. Tikhonov, A.I. *Osnovy teorii podobiya i modelirovaniya* [Fundamentals of the theory of similarity and modeling]. Ivanovo, 2016. 116 p.

13. Kish, L. *Nagrev i okhlazhdeniya transformatorov* [Heating and cooling of transformers]. Moscow: Energiya, 1980. 208 p.

14. Stulov, A.V., Tikhonov, A.I., Kornev, I.A. *Razrabotka mnogourovnevnoy podsystemy teplovykh raschetov SAPR aktivnoy chasti raspredelitel'nykh transformatorov* [Development of a multilevel subsystem of thermal calculations CAD of the active part of distribution transformers]. Ivanovo, 2014. 96 p.

УДК 66.096.5

Андрей Васильевич Митрофанов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45; e-mail: and2mit@mail.ru

Ольга Владимировна Сизова

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и цифровой экономики, Россия, Иваново, e-mail: siz-olga@yandex.ru

Наталья Сергеевна Шпейнова

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

Вадим Александрович Катюшин

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

Математическое моделирование и анализ функционирования цилиндрического пиролизного реактора с радиальным нагревом

Авторское резюме

Состояние вопроса. Вектор развития твердотопливной энергетики в настоящее время направлен в сторону расширения диапазона используемых возобновляемых видов топлива. Наряду с прямым сжиганием топлива все более широкую нишу занимают процессы регулируемого термического преобразования исходной биомассы в бескислородной среде для получения на ее основе нового топлива (жидкого, твердого, газообразного). Значительная часть исследований в этой области связана с изучением формальной кинетики подобных процессов, в то же время не менее важным, но менее исследованным вопросом является аппаратное оформление процесса. Последнее делает актуальным построение математических моделей функционирования пиролизной аппаратуры.

Материалы и методы. В качестве математической основы моделирования физико-химических превращений и процессов переноса в радиальном направлении цилиндрического пиролизного реактора выбрана явная разностная аппроксимация этих процессов в рамках осесимметричной постановки задачи. Материальные константы процессов заимствованы из известных литературных источников.

Результаты. С использованием предложенной и верифицированной ранее одномерной математической модели цилиндрического пиролизного реактора исследованы неохваченные натурным экспериментом режимы его функционирования. Рассмотрены вопросы влияния безразмерной кинетической функции процесса (модели реакции) на реализацию термопреобразования материала в аппарате. Показано существенное влияние выбранной модели реакции на кинетический характер процесса, а также взаимное влияние сушки и пиролиза, наличие которого связано с энергетическими эффектами процессов. Выявлена существенная пространственная неоднородность процесса и показана возможность существования нетривиального эффекта опережающего нагрева внутренних зон аппарата по сравнению с периферийными.

Выводы. Вычислительный эксперимент может помочь обнаружить нетривиальные эффекты и показать вариативность реализации процесса даже в рамках одного конструктивно-технологического оформления процесса пиролиза. Результаты численных экспериментов, на наш взгляд, указывают на то, что математическое моделирование может быть основой принятия технологических решений. Однако необходимы дальнейшие исследования, направленные на достоверное определение материальных констант процесса.

Ключевые слова: пиролиз, твердое топливо, явная разностная аппроксимация, кинетика, цилиндрический пиролизный реактор

Andrey Vasilyevich Mitrofanov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: and2mit@mail.ru

Olga Vladimirovna Sizova

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Information Technologies and Digital Economics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: siz-olga@yandex.ru

Natalia Sergeevna Shpeynova

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

Vadim Aleksandrovich Katyushin

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: katyushin_v@mail.ru

Mathematical modeling and analysis of operation of cylindric pyrolysis reactor with radial heating

Abstract

Background. The vector of development of solid-fuel energy is currently directed towards expanding the range of renewable fuels used. Along with the direct combustion of fuel, the processes of controlled thermal transformation of the raw biomass in an oxygen-free surrounding to obtain a new fuel based on it (liquid, solid, gaseous) are widely spread. A significant part of research in this sphere is related to the study of the formal kinetics of such processes, at the same time, the hardware design of the process is no less important, but less studied. Thus, development of mathematical models of pyrolysis equipment operation is relevant.

Materials and methods. A decisive difference approximation of these processes in the framework of an axisymmetric formulation of the problem is chosen as a mathematical basis for modeling physical and chemical transformations and transfer processes in the radial direction of a cylindrical pyrolysis reactor. The material constants of the processes are borrowed from the well-known literature references

Results. The authors studied the modes of reactor operation not covered by a full-scale experiment, using the previously proposed and verified one-dimensional mathematical model of a cylindrical pyrolysis reactor. The issues of the influence of the dimensionless kinetic function of the process (reaction model) on the thermal transformation of the material in the apparatus are considered. The significant influence of the chosen reaction model on the kinetic nature of the process is pointed out. The mutual influence of drying and pyrolysis the presence of which is due to the energy effects of the processes is considered. A significant spatial heterogeneity of the process is defined and the possibility of the existence of a non-trivial effect of advanced heating of the internal zones of the apparatus in comparison with the peripheral ones is specified.

Conclusions. The paper shows that a computational experiment can help to detect non-trivial effects and identify the variability of the process implementation even within the framework of a single design and technological solution of the pyrolysis process. According to the authors, the results of the obtained numerical experiments indicate that mathematical modeling can be the basis of making technological solution. However, further research is also needed to determine reliably the material constants of the process.

Key words: pyrolysis, solid fuel, decisive difference approximation, kinetics, cylindric pyrolysis reactor

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.060-067

Введение. На сегодняшний день вектор развития энергетических комплексов ряда стран, в том числе Российской Федерации, направлен на диверсификацию энергетики путем увеличения твердотопливной ниши за счет вовлечения в оборот различных видов возобновляемого местного топлива [1]. При этом одним из перспективных процессов термохимической переработки органических материалов является их пиролиз или газификация, осуществляемая в отсутствие кислорода при повышенных температурах [2–3].

Большое количество исследовательских работ направлено на изучение формальной кинетики брутто-реакции термopреобразования материала, а также на развитие методов оценки кинетических параметров реакции. Результаты такого рода исследований с акцентом на различные виды местного сырья достаточно активно публикуются [4–6]. При этом используются хорошо апробированные методы, включающие термогравиметрический анализ разложения образцов материала [4–6], и соответствующие методики обработки полу-

ченных данных для установления кинетических параметров реакции (подробный анализ возможных подходов к восстановлению кинетических параметров приведен в [7]). Необходимо отметить, что под кинетическими параметрами понимается триплет: энергия активации E , Дж·моль⁻¹; предэкспоненциальный множитель A , с⁻¹; безразмерная кинетическая функция реакции f . Первые два параметра определяют константу скорости реакции, которая считается функцией температуры вещества, а кинетическая функция полагается зависящей от степени завершения процесса, типа и механизма реакции [6–8].

Несмотря на то, что установление кинетических параметров является важной и актуальной задачей, решение которой формирует первооснову для внедрения соответствующих технологических решений, на наш взгляд, гораздо менее исследованным является следующий этап жизненного цикла процесса – его аппаратное оформление [2, 9]. В связи с этим представляется актуальным развитие методов расчета и моделирования пиролизной аппаратуры, а также анализ сценарных вариантов развития процесса в аппарате, если теоретическая модель функционирования этого аппарата в достаточной мере формализована и верифицирована.

Ниже предлагается теоретический анализ сценарных вариантов проведения пиролиза в цилиндрическом аппарате, полученных как результат численных экспериментов с разработанной и верифицированной ранее [2] математической моделью. В [2] показана продуктивность использования модели для описания конкретного процесса в аппарате периодического принципа действия, однако исследования функционирования самой модели не проводилось.

Необходимость анализа сценариев развития процесса обусловлена, на наш взгляд, тем, что явление пиролиза, если его рассматривать как технологический процесс, является весьма вариативным. Отмеченная вариативность обусловлена колебаниями характеристик исходного сырья, а именно влажностью древесной биомассы и ее составом (породой древесины). В [2] достигнуто хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных при определенном наборе значений материальных констант. Последнее говорит о качественной непротиворечивости модели

и возможности дальнейшей работы с моделью уже без опоры на данные натурального эксперимента.

Ниже проведено численное исследование параметров работы цилиндрического аппарата с радиальным нагревом, в котором происходит обезвоживание древесной биомассы и ее пиролиз. Процесс удаления влаги требует затрат энергии, нагрев материала также необходим для инициации реакции пиролиза, которая, однако, сама является экзотермической.

Материалы и методы. Подробное описание математической модели представлено в [2], поэтому ниже излагаются только основные ее положения.

Для моделирования распространения теплоты в радиальном направлении реактора используется одномерная модель с явной разностной аппроксимацией процесса нестационарной теплопроводности. Для такой расчетной схемы (рис. 1) представительным элементом является цилиндрический слой толщиной Δr .

Внутри такого слоя все свойства считаются равномерно распределенными, однако введение в рассмотрение набора из счетного числа n указанных элементов позволяет рассмотреть аппарат как объект с распределенными параметрами. Для записи распределения определенного параметра вводится вектор-столбец соответствующего состояния.

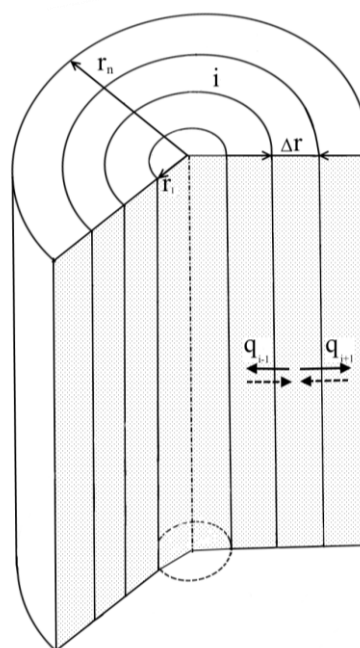


Рис. 1. Разностная схема численного моделирования радиальной теплопроводности в цилиндрическом реакторе

Так, распределение теплосодержаний слоев описывается вектором-столбцом теплового состояния реакторного пространства $\mathbf{Q} = \{Q_{ij}\}$, имеющего размерность $n \times 1$. Векторы аналогичной размерности характеризуют и другие параметры процесса.

Эволюция вектора состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1) \Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода, k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени). Эволюция состояния рассчитывается на основе рекуррентных матричных процедур. При рассмотрении теплового баланса в i -й ячейке учитывается, что она граничит с соседними ячейками с номерами $(i + 1)$ и $(i - 1)$, которые могут обмениваться с ней порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1} .

Считается также, что все пространство реактора занято дисперсным материалом, подлежащим термопреобразованию. Такое допущение позволяет считать, что теплопроводность элементарных объемов аппарата определяются эффективной теплопроводностью материала в рыхлонасыпанном состоянии. При этом коэффициент теплопроводности слоя сыпучего материала λ является функцией степени завершенности процесса α [10]:

$$\lambda = (1 - \varepsilon^{2/3}) \lambda_s + \frac{\varepsilon^{2/3}}{\left(1 - \varepsilon^{1/3} / (2\lambda_s)\right) + \left(\varepsilon^{1/3} / \lambda_g\right)}, \quad (1)$$

где ε – пористость слоя ($\varepsilon = 0,7$); λ_s – теплопроводность материала частиц, зависящая от степени конверсии α материала ($\lambda_s = (0,2 - 0,142\alpha)$) [10]; λ_g – то же газовой фазы.

Таким образом, теплопроводность материала в отдельных элементах слоя зависит от положения этих элементов и времени процесса ($\lambda = \lambda(i, k)$).

Изменение состояния процесса во времени описывается на основе рекуррентных матричных процедур, отражающих тепловой баланс совокупности цилиндрических слоев. При рассмотрении теплового состояния в i -м слое учитывается, что он обменивается порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1} с соседними слоями. При этом:

- для $i = \overline{2, n}$

$$q_{i-1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_{i-1} L) \Delta t; \quad (2)$$

- для $i = \overline{1, n-1}$

$$q_{i+1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i+1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_i L) \Delta t, \quad (3)$$

где T_i – элемент вектора температур материала $\mathbf{T} = \{T_{ij}\}$; L – высота аппарата.

Балансовые соотношения (2)–(3) описывают перенос теплоты в радиальном направлении аппарата. При этом внутри каждой ячейки могут содержаться внутренние источники или стоки теплоты. Источники теплоты связаны с наличием экзотермических эффектов реакции пиролиза, а также с поступлением теплоты через боковую (нагреваемую) поверхность аппарата.

Реакция пиролиза описывается кинетической зависимостью вида [7–8]

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot f(\alpha), \quad (4)$$

где k – аррениусовское выражение для константы скорости, которое записывается для каждого i -го элемента объема аппарата и зависит от температуры T_i^k в нем [7–8]:

$$k_i^k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_i^k}\right).$$

Значения энергии активации E и предэкспоненциального множителя A определяются экспериментально для конкретного материала [6–8]. При постоянном значении степени превращения α скорость реакции зависела бы только от температуры, однако очевидно, что степень превращения оказывает влияние на кинетику реализации процесса, поэтому вводится некоторая функция $f(\alpha)$, которая представляет собой математическую модель безразмерной кинетической функции и зависит от типа и механизма реакции. Функция $f(\alpha)$ имеет вид [6–8]

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^\eta, \quad (5)$$

где η – численный параметр модели, называемый порядком реакции [6–8].

При использовании модели реакции (5) пиролиз древесной биомассы может быть описан как реакция первого порядка [4, 16].

Однако в [11] показано, что разложение древесной биомассы в области температур 400–600 °С протекает в соответствии с сигмоидальным уравнением Аврами–Ерофеева и, соответственно,

$$f(\alpha) = 2(1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}. \quad (6)$$

Процесс обезвоживания древесной биомассы в реакторах подобного типа при-

нято рассматривать как процесс, описываемый во многом аналогично химической реакции [12–14].

В результате масса влаги, удаляемая за малый интервал времени Δt из материала, содержащегося в каждой ячейке, рассчитывается как

$$\Delta m_{w,i} = k_{w,i}^k (X_{w0} - X_{w,i}^k) m_{w,i}^k \Delta t, \quad (7)$$

где k_w – константа скорости процесса обезвоживания материала; X_w и X_{w0} – текущее и начальное влагосодержание материала ячейки; m_w – масса влаги в материале ячейки.

Константа скорости процесса записана в форме аррениусовской зависимости:

$$k_{w,i}^k = k_{w0} \exp\left(-\frac{E_{aw}}{RT_i^k}\right), \quad (8)$$

где $k_{w0} = 5,13 \cdot 10^{10}$; $E_{aw} = 88$ кДж/моль – энергия активации процесса [12–14].

Соотношения (1)–(8) позволяют записать балансы содержания теплоты по ячейкам. Как показано в [2], это удобно сделать, записав сначала уравнения, описывающие пространственный перенос теплоты, который происходит особым образом для крайних ячеек (наружной (при $i = n$) и внутренней ($i = 1$)):

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_{i+1}^k \quad \text{для } i = \overline{2, (n-1)}; \quad (9)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i+1}^k \quad \text{для } i = 1; \quad (10)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_s^k \quad \text{для } i = n, \quad (11)$$

где $q_s^k = -\lambda_n^k (T_n^k - T_s) (2\pi r_n L) \Delta t / dr$ – количество теплоты, поступающее в реактор от источника через наружную поверхность аппарата на k -м рекуррентном шаге; температура поверхности реактора T_s считается постоянной (изотермическое граничное условие).

Затем сформированный вектор теплового содержания Q корректируется путем добавления слагаемых, которые определяются наличием объемных источников и стоков теплоты из-за протекания реакции пиролиза и кватиреакции обезвоживания:

$$Q^{k+1} = Q^{k+1} + k_p^k \cdot M^k \cdot \Delta t \cdot r_r - \Delta m_w^k \cdot r_w, \quad (12)$$

где r_r – удельный тепловой эффект реакции пиролиза древесины ($r_r = 1150$ кДж/кг) [11]; r_w – то же испарения влаги ($r_w = 2600$ кДж/кг) [15].

Естественно, что, помимо пространственно-временных изменений теплосо-

держания, в аппарате происходит перенос и изменение других аддитивных свойств, однако описание соответствующих уравнений представлено в [2] и нами не приводится. Ниже предлагается анализ сценариев, связанных с неоднозначностью идентификации кинетического триплета (параметров $f(\alpha)$, E и k) и постановкой задач оптимального управления (так, в [17] показано, что пути повышения производительности функционирования аппарата могут быть найдены и независимо от точности определения конкретных материальных констант процесса).

Результаты. На рис. 2–3 представлены дифференциальные расчетные кривые убыли массы материала в аппарате в целом, полученные при использовании различных представлений о модели протекания реакции. Оба расчета (рис. 3–8) выполнены для аналогичных конструктивных и технологических условий: начальная влажность биомассы 30 %; $L = 0,5$ м; $r_n = 0,5$ м; $\Delta r = r_n/10$ м; $T_s = 450$ °С; $\Delta t = 0,75$ с; $k = 38,5 \cdot \exp(-57200/RT) \text{ с}^{-1}$ [11].

Убыль массы происходит в результате двух процессов: удаления влаги и термопреобразования материала. Связь между этими процессами осуществляется через формирование общего температурного поля в аппарате. Пиролиз сопровождается выделением теплоты, в то время как сушка является исключительно энергозатратной.

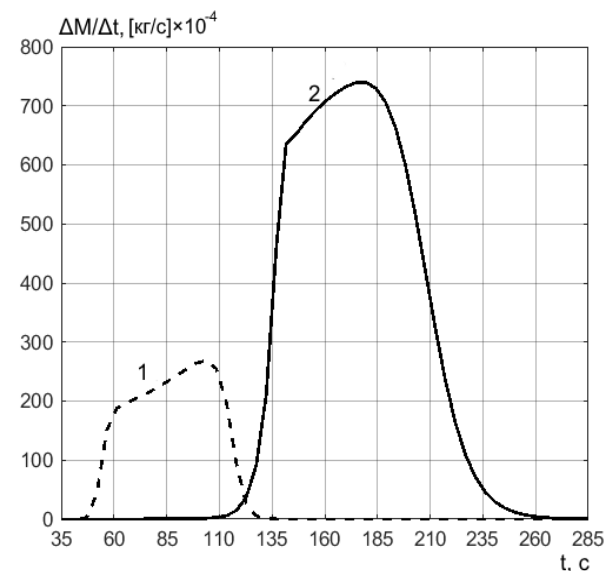


Рис. 2. Расчетные дифференциальные кривые уменьшения массы навески при использовании модели реакции (5): 1 – для процесса сушки частиц; 2 – для процесса термической конверсии частиц

Анализ полученных кривых (рис. 2) показывает, что процесс обезвоживания материала только на малом промежутке времени (в интервале от 110 до 127 мин) совпадает с процессом пиролиза. Однако в этом временном интервале процесс пиролиза (целевой процесс) замедляется, а после удаления влаги (в интервале от 127 мин до 135 мин) растет практически линейно.

Результаты подобного расчета, в котором, однако, полагается справедливой модель реакции (6), приведены на рис. 3. Анализ полученных результатов показывает, что процессы сушки и пиролиза при таком сценарии происходят последовательно, не влияя друг на друга. Кроме того, ожидается, что целевой процесс при таком сценарии реализуется быстрее (за 231 мин).

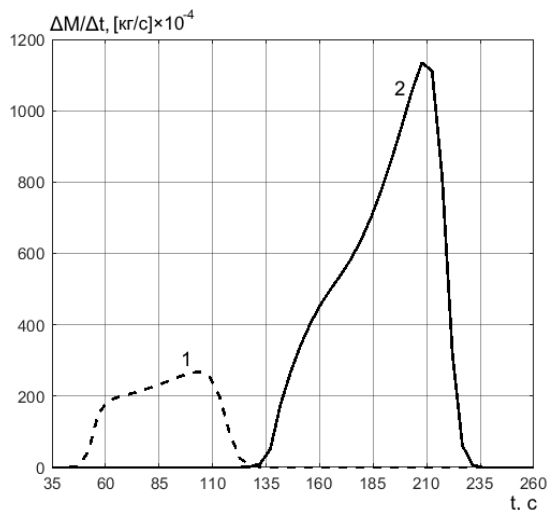


Рис. 3. Расчетные дифференциальные кривые уменьшения массы навески при использовании модели реакции (6): 1 – для процесса сушки частиц; 2 – для процесса термической конверсии частиц

Дальнейший анализ рассматриваемых расчетных сценариев показывает, что процесс в целом характеризуется значительной пространственной неоднородностью. Так, на рис. 4–5 показаны изменения эффективной (с учетом влагосодержания) плотности материала в наружном и внутреннем цилиндрических слоях.

В обоих случаях обращает на себя внимание тот факт, что завершение процесса наступает раньше внутри реактора, хотя нагревается периферия слоя. Объяснение этому можно дать, анализируя радиальные температурные профили материала в аппарате (рис. 6–7). С некоторого момента (разного в зависимости от принятой кинетической модели) за счет экзотерми-

ческого характера самой реакции внутренние зоны аппарата разогреваются больше, чем внешние, что приводит к ускоренной реализации реакции в этих областях.

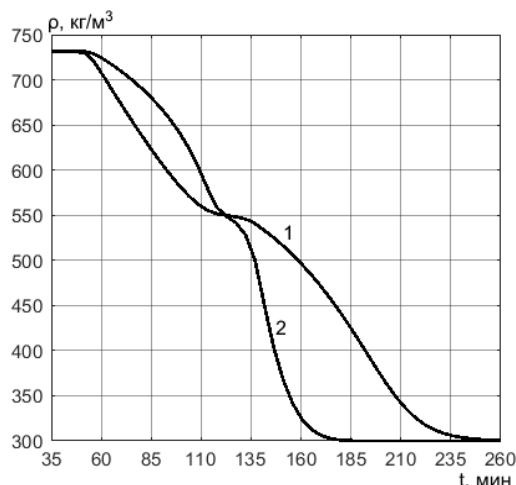


Рис. 4. Изменение эффективной плотности материала в процессе термообработки при использовании модели реакции (5): 1 – в центральной (внутренней) ячейке слоя; 2 – в наружном цилиндрическом слое

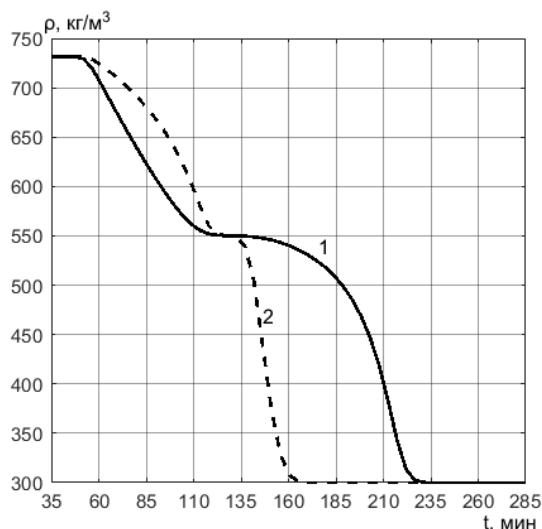


Рис. 5. Изменение эффективной плотности материала в процессе термообработки при использовании модели реакции (6): 1 – в центральной (внутренней) ячейке слоя; 2 – в наружном цилиндрическом слое

Следует также отметить, что в реакторе достигаются достаточно схожие температурные режимы (рис. 6–7, линии 1–3). Существенная разница наблюдается при рассмотрении линий 4–5 на рис. 6–7. Последнее обстоятельство связано с тем, что при использовании модели реакции (6) к моментам времени 220 и 235 скорость реакции резко снижается, поэтому ее тепловой эффект не поддерживает повышение температуры (рис. 2–3).

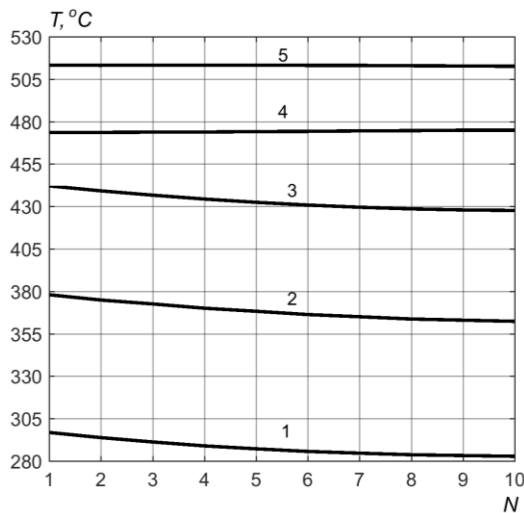


Рис. 6. Расчетные радиальные профили температур в различные моменты времени при использовании модели реакции (5): 1 – 100 мин; 2 – 150 мин; 3 – 185 мин; 4 – 220 мин; 5 – 235 мин (номер ячейки N отсчитывается в радиальном направлении от поверхности к оси аппарата)

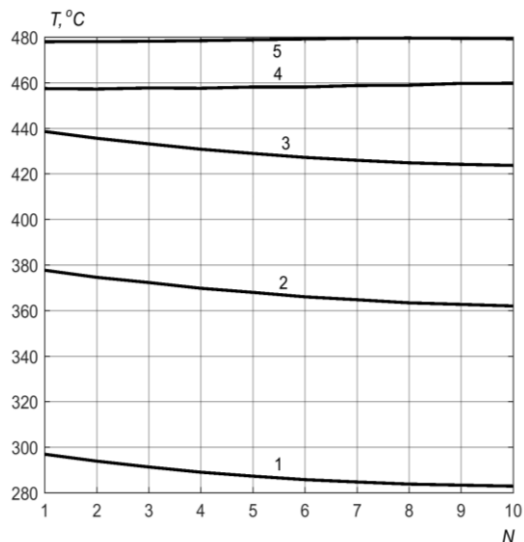


Рис. 7. Расчетные радиальные профили температур в различные моменты времени при использовании модели реакции (6): 1 – 100 мин; 2 – 150 мин; 3 – 185 мин; 4 – 220 мин; 5 – 235 мин (номер ячейки N отсчитывается в радиальном направлении от поверхности к оси аппарата)

Выводы. Численное исследование сценариев работы цилиндрического реактора периодического действия для сушки и пиролиза древесной биомассы, отличающихся теоретическими представлениями о модели брутто-реакции (разным видом безразмерной кинетической функции), показало, что, в зависимости от выбранных кинетических параметров реакции, процесс удаления влаги может происходить параллельно с целевым процессом, затормаживая последний (ввиду противоположных энергетических

эффектов пиролиза и обезвоживания), что необходимо учитывать при построении режимных карт технологического процесса. Выявлен требующий эмпирической проверки нетривиальный эффект более интенсивного разогрева внутренних зон аппарата из-за термических эффектов реакции.

Список литературы

1. **Фортов В.Е., Попель О.С.** Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 6. – С. 4–13.
2. **Экспериментальное** и расчетное исследование пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе / А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов, С.В. Василевич, М.В. Малько // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2021. – Вып. 64, № 1. – С. 51–64.
3. **Zhang L., Xu C.C., Champagne P.** Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass // *Energy Convers. Manag.* – 2010. – Vol. 51. – P. 969–982.
4. **Pyrolysis of Pruning Residues from Various Types of Orchards and Pretreatment for Energetic Use of Biochar** / P. Kazimierski, P. Hercel, T. Suchocki, et al. // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 2969.
5. **Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К.** Анализ термогравиметрических данных различных видов древесины // *Химия твердого топлива*. – 2015. – Вып. 2. – С. 59–64.
6. **Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К.** Анализ термогравиметрических и кинетических данных различных видов древесного биотоплива Северо-Западного региона Российской Федерации // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2016. – № 1. – С. 167–182.
7. **Кинетический** анализ термохимической конверсии твердых топлив / А.Н. Козлов, Д.А. Свищев, Г.И. Худякова, А.Ф. Рыжков // *Химия твердого топлива*. – 2017. – № 4. – С. 12–21.
8. **Новый** метод анализа термогравиметрических данных / М.В. Малько, С.В. Василевич, А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2021. – Т. 64, вып. 3. – С. 24–32.
9. **Experimental** and modeling analysis of a batch gasification/pyrolysis reactor / P. Baggio, M. Baratieri, L. Fiori, et al. // *Energy Conversion and Management*. – 2009. – Vol. 50. – P. 1426–1435.
10. **Radiative** Pyrolysis of Wet Wood under Intermediate Heat Flux: Experiments and Modelling / V. Pozzobon, S. Salvador, J.J. Bébian, et al. // *Fuel Processing Technology*. – 2014. – Vol. 128. – P. 319–330.
11. **Малько М.В., Василевич С.В.** Исследование кинетики пиролиза древесной биомас-

сы в изотермических условиях // Вестні НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 321–331.

12. **Bryden K.M., Hagge M.J.** Modeling the Combined Impact of Moisture and Char Shrinkage on the Pyrolysis of a Biomass Particle // *Fuel*. – 2003. – Vol. 82. – P. 1633–1644.

13. **Comprehensive** study of biomass particle combustion / H. Lu, W. Robert, G. Peirce, et al. // *Energy and Fuels*. – 2008. – Vol. 22. – P. 2826–2839.

14. **Fatehi H., Bai X.S.** A Comprehensive Mathematical Model for Biomass Combustion // *Combustion Science and Technology*. – 2014. – Vol. 186. – P. 574–593.

15. **Mujumdar A.S.** Handbook of Industrial Drying. – 3rd ed. – New York, CRC Press; Taylor & Francis Group, 2006. – 1312 p.

16. **Термическое** разложение древесины тропических пород / Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, Б.Д. Тхань, Р.М. Асеева // *Лесной вестник*. – 2005. – Вып. 2. – С. 70–76.

17. **Theoretical** Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Camelo, L. Ovchinnikov // *Recent Innovations in Chemical Engineering*. – 2018. – No. 11 (1). – P. 20–28.

References

1. Fortov, V.E., Popel', O.S. Sostoyanie razvitiya vozobnovlyаемых источников энергии в мире и в России [The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia]. *Teploenergetika*, 2014, no. 6, pp. 4–13.

2. Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E., Vasilevich, S.V., Mal'ko, M.V. Eksperimental'noe i raschetnoe issledovaniya piroliza biomassy v tsilindricheskom reaktore [Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 51–64.

3. Zhang, L., Xu, C.C., Champagne, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Convers. Manag.*, 2010, vol. 51, pp. 969–982.

4. Kazimierski, P., Hercel, P., Suchocki, T., Smoliński, J., Pladzyk, A., Kardaś, D., Łuczak, J., Januszewicz, K. Pyrolysis of Pruning Residues from Various Types of Orchards and Pretreatment for Energetic Use of Biochar. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 2969.

5. Mar'yandyshev, P.A., Chernov, A.A., Lyubov, V.K. Analiz termogravimetricheskikh dannykh razlichnykh vidov drevesiny [Analysis of Thermogravimetric Data for Different Forms of Wood]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2015, vol. 2, pp. 59–64.

6. Mar'yandyshev, P.A., Chernov, A.A., Lyubov, V.K. Analiz termogravimetricheskikh i kineticheskikh dannykh razlichnykh vidov

drevesnogo biotopliva Severo-Zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii [Thermogravimetric and Kinetic Data Analysis of Wood Biofuels in the North-Western Region of the Russian Federation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 1, pp. 167–182.

7. Kozlov, A.N., Svishchev, D.A., Khudyakova, G.I., Ryzhkov, A.F. Kineticheskiy analiz termokhimicheskoy konversii tverdykh topliv [Kinetic analysis of thermo-chemical conversion of solid fuels]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2017, no. 4, pp. 12–21.

8. Mal'ko, M.V., Vasilevich, S.V., Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E. Novyy metod analiza termogravimetricheskikh dannykh [An innovative method of thermogravimetric data analysis]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 24–32.

9. Baggio, P., Baratieri, M., Fiori, L., Grigante, M., Avi, D., Tosi, P. Experimental and modeling analysis of a batch gasification/pyrolysis reactor. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, pp. 1426–1435.

10. Pozzobon, V., Salvador, S., Bézian, J.J., El-Hafi, M., Le Maoult, Y. Radiative Pyrolysis of Wet Wood under Intermediate Heat Flux: Experiments and Modelling. *Fuel Processing Technology*, 2014, vol. 128, pp. 319–330.

11. Mal'ko, M.V., Vasilevich, S.V. Issledovanie kinetiki piroliza drevesnoy biomassy v izotermicheskikh usloviyakh [Kinetics of Pyrolysis of Wood Biomass under Isothermal Conditions]. *Vesti Natsyynal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 321–331.

12. Bryden, K.M., Hagge, M.J. Modeling the Combined Impact of Moisture and Char Shrinkage on the Pyrolysis of a Biomass Particle. *Fuel*, 2003, vol. 82, pp. 1633–1644.

13. Lu, H., Robert, W., Peirce, G., Ripa, B., Baxter, L.L. Comprehensive study of biomass particle combustion. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, pp. 2826–2839.

14. Fatehi, H., Bai, X.S. A Comprehensive Mathematical Model for Biomass Combustion. *Combustion Science and Technology*, 2014, vol. 186, pp. 574–593.

15. Mujumdar, A.S. Handbook of Industrial Drying. New York, CRC Press; Taylor & Francis Group, 2006. 1312 p.

16. Sivenkov, A.B., T Khan', B.D., Serkov, B.B., Aseeva, R.M. Termicheskoe razlozhenie drevesiny tropicheskikh porod [Thermal decomposition of some tropical wood species]. *Lesnoy vestnik*, 2005, issue 2, pp. 70–76.

17. Mizonov, V., Mitrofanov, A., Camelo, A., Ovchinnikov, L. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 2018, no. 11(1), pp. 20–28.

УДК 536.24.08

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

Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в контактных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Приоритетами государственной энергетической политики Российской Федерации, в том числе, являются: переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, рациональное природопользование и энергетическая эффективность. Одним из направлений энергосбережения является максимальное использование теплоты сгорания топлива с одновременным получением конденсата из продуктов сгорания природного газа. Несмотря на большое количество научных публикаций по утилизации тепла дымовых газов на большинстве газовых котельных, энергетических предприятий и тепловых электрических станций, в нашей стране конденсационные теплоутилизаторы не применяются. Этому есть ряд причин, вызванных отсутствием универсальных методик расчета и проектирования теплоутилизаторов конденсационного типа. В связи с этим разработка новых методов моделирования многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях является актуальной задачей для энергетики.

Материалы и методы. Для решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях использованы матричные модели теплопередачи, построенные на уравнениях баланса массы и энергии.

Результаты. Разработан метод расчета и выбора конструкций многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях. Для иллюстрации эффективности предложенного метода выполнено численное решение задачи по выбору конструкции контактного экономайзера парового котла ТЭС, используемого для утилизации тепла дымовых газов.

Выводы. Предложенный метод решения обратной задачи теплопередачи обеспечивает возможность одновременного поиска наиболее приемлемых значений параметров теплоносителей и конструктивных характеристик теплообменных аппаратов различного назначения.

Ключевые слова: обратная задача теплопередачи, матричная модель теплопередачи, фазовый переход, многопоточный теплообменник, баланс энергии, баланс массы, теплообменные аппараты, дымовые газы, тепловые электрические станции

Aleksei Yevgenyevich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: acorp27@yandex.ru

Matrix method to solve inverse problem of heat transfer in heat exchangers with phase transition in heat carriers

Abstract

Background. The transition to environmentally friendly and resource-saving energy, efficient use of natural resources and energy performance are the key priorities of the state energy policy of the Russian Federation. Maximum use of heat combustion of fuel and simultaneously production of condensate water of the combustion products of natural gas is one of the directions of energy saving policy. Despite many scientific papers on the issues of utilization of flue gas heat, condensation heat exchangers are not used in most gas boiler houses, energy power providers and thermal power plants in this country. And there are several reasons to explain this fact due to the lack of universal methods to calculate and design condensation-type heat exchangers. Thus, the development of new methods to simulate multithreaded heat exchangers considering the phase transition in heat carriers is an urgent task of power engineering and industry sectors.

Materials and methods. Matrix models of heat transfer based on mass and energy balance equations are applied to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers, considering the phase transition in heat carriers.

Results. A method to calculate and select the designs of multi-threaded heat exchangers, considering the phase transition in heat carriers, has been developed. The author suggests a numerical solution to choose the design of a contact economizer of a heat power plant steam boiler used for heat recovery of flue gases to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Conclusions. The proposed method to solve the inverse problem of heat transfer provides the possibility to identify simultaneously the most acceptable values of the parameters of heat carriers and design characteristics of heat exchangers for various purposes.

Key words: inverse heat transfer problem, matrix model of heat transfer, phase transition, multithreaded heat exchanger, energy balance, mass balance, heat exchangers, flue gases, thermal power plants

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.068-075

Введение. По способу использования математических моделей при проведении теплотехнических расчетов можно выделить прямые и обратные задачи. Прямые задачи предполагают выполнение конструкторского или поверочного расчетов, которые в первом случае необходимы для определения поверхности теплообмена и конструктивных размеров выбранного аппарата, а во втором – для проверки возможности получения требуемых параметров теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата при фиксированных конструктивных параметрах [1–3]. В обратных задачах реализуются проектные расчеты, которые ориентированы на одновременный подбор как конструктивных, так и режимных параметров работы теплообменных аппаратов, обеспечивающих наиболее эффективную работу оборудования [1], что сокращает общее время и количество расчетов.

Ранее [4] была рассмотрена задача решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах без фазового перехода. Ниже выполнено развитие данного подхода на случай учета фазового перехода в теплоносителях. Возможности матричного метода решения обратной задачи теплопередачи продемонстрированы на примере контактных многопоточных теплообменников, используемых для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов на ТЭС [5–10]. В качестве греющих потоков теплоносителей в данных аппаратах выступают дымовые газы и водяные пары, в качестве нагреваемого потока – охлаждающая вода. Объем водяных паров, получаемых при сжигании 1 м^3 природного газа, составляет $2,1\text{--}2,5 \text{ м}^3$. Конденсация водяных паров из дымовых га-

зов позволяет увеличить КПД парового или водогрейного котла, а также получить дополнительный поток теплоносителя, который может быть использован в тепловой схеме ТЭС или котельной. Внедрение в энергетике теплообменных аппаратов для утилизации тепла дымовых газов сдерживается отсутствием методов расчета многопоточных теплообменных аппаратов с возможным фазовым переходом в теплоносителях. Таким образом, моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях являются для энергетики актуальной задачей.

Объектом исследования являются многопоточные теплообменные аппараты.

Предметом исследований является метод решения обратной задачи теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях [2, 3, 11].

Целью исследования является определение наиболее эффективных конструктивных и режимных характеристик многопоточных теплообменных установок с фазовым переходом теплоносителей.

Методы исследования. Для решения обратной задачи теплопередачи с фазовым переходом теплоносителей используются математические модели теплообмена, построенные на дифференциальных уравнениях баланса массы и энергии [11–14]. Для решения полученной в ходе моделирования системы дифференциальных уравнений применяются численные и аналитические методы, а также методы математического программирования [15–18].

Схема установки контактного теплообменного аппарата представлен на рис. 1.

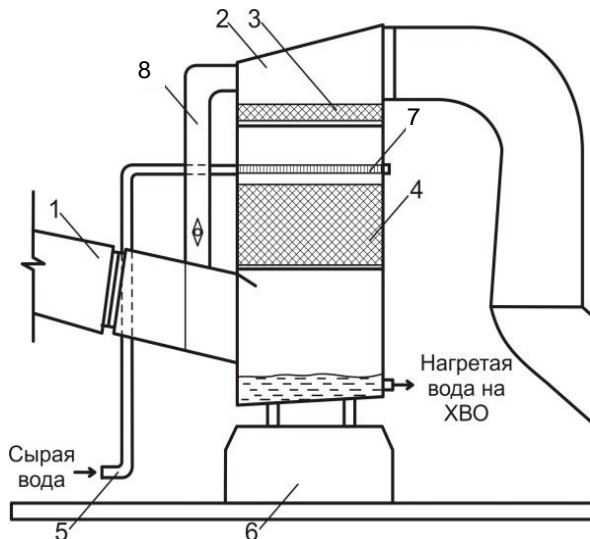


Рис. 1. Схема установки контактного экономайзера: 1 – входной газоход из конвективной части котла; 2 – контактный экономайзер; 3 – каплеулавливающая насадка; 4 – слой рабочей насадки; 5 – вход сырой воды; 6 – фундамент; 7 – водораспределитель из перфорированных труб; 8 – байпасный газоход

Расчетная схема процесса теплопередачи с фазовым переходом первого теплоносителя и с указанием направления движения потоков теплоносителей представлена на рис. 2. Поверхность нагрева разделена на две части: без фазового перехода (F_1) и с фазовым переходом (F_2). Принимается допущение, что потоки теплоносителей двигаются по отдельным каналам без перемешивания внутри аппарата. Смешение теплоносителей происходит на выходе из установки.

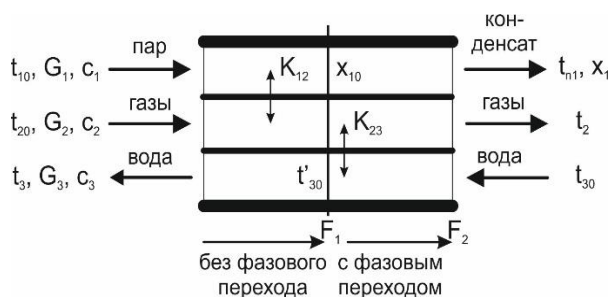


Рис. 2. Расчетная схема трехпоточного теплообменного аппарата с указанием направления движения потоков теплоносителей и потоков тепловой энергии за счет теплопередачи

Разработка модели процесса осуществляется в два этапа: на первом этапе происходит охлаждение дымовых газов без фазового перехода до точки росы, на втором – конденсация водяных паров. Математическая модель теплопередачи для

первого этапа в виде системы трех дифференциальных уравнений относительно температур водяных паров t_1 , дымовых газов t_2 и охлаждающей воды t_3 при отсутствии в них фазового перехода записывается следующим образом [13, 19]:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = -a_1 t_1 + a_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_1 - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = -a_4 t_2 + a_4 t_3, \end{cases} \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; $a_1 = K_{12} / (c_1 G_1)$, $a_2 = K_{12} / (c_2 G_2)$, $a_3 = K_{23} / (c_2 G_2)$, $a_4 = K_{23} / (c_3 G_3)$; одинарный индекс показывает номер теплоносителя; двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам теплоносителей, между которыми происходит теплопередача.

Для начальных условий $t_1|_{F=0} = t_{10}$,

$t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_3|_{F=F_1} = t_{30}$ (F_1 – площадь поверхности теплообмена) решение системы (1) запишем в следующем виде [4]:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$b_{11} = \frac{(S_2 - S_1) + (S_3 e^{F_2 F_1} - S_1) + (1 - S_2) e^{F_2 F} + S(S_1 - e^{F_2 F})}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{12} = \frac{(1 - S_3 e^{F_2 F_1}) + (1 - S_2) e^{F_2 F} + S(e^{F_2 F} - 1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{13} = \frac{(S_2 - S_1) + (1 - S_2) e^{F_2 F} + (S_1 - 1) e^{F_3 F}}{S};$$

$$b_{21} = \frac{(S_2 - S_1) + \left[(S_3 e^{r_2 F_1} - S_1) + (1 - S_2) S_1 e^{r_2 F} + (S_1 - 1) S_2 e^{r_3 F} \right] + S_1 S (1 - e^{r_2 F})}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{22} = \frac{(1 - S_3 e^{r_2 F_1}) + \left[(S_2 - S_1) + (S_1 - 1) S_2 e^{r_3 F} + (1 - S_2) S_1 e^{r_2 F} \right] + S(S_1 e^{r_2 F} - 1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{23} = \frac{(S_1 - 1) S_2 e^{r_3 F} + (1 - S_2) S_1 e^{r_2 F} + (S_2 - S_1)}{S};$$

$$b_{31} = \frac{(S_3 e^{r_2 F_1} - S_1) + \left[(S_2 - S_1) + (S_1 - 1) S_4 e^{r_3 F} + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F} \right] - S(S_3 e^{r_2 F} - S_1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{32} = \frac{(1 - S_3 e^{r_2 F_1}) + \left[(S_2 - S_1) + (S_1 - 1) S_4 e^{r_3 F} + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F} \right] - S(-S_3 e^{r_2 F} + 1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{33} = \frac{(S_1 - 1) S_4 e^{r_3 F} + (S_2 - S_1) + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F}}{S};$$

$$S = S_4 e^{r_3 F_1} (S_1 - 1) + S_2 - S_1 + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F_1};$$

$$S_1 = \frac{a_1 + r_2}{a_1}; \quad S_2 = \frac{a_1 + r_3}{a_1};$$

$$S_3 = \frac{r_2^2 + r_2(a_1 + a_2 + a_3) + a_1 a_3}{a_1 a_3};$$

$$S_4 = \frac{r_3^2 + r_3(a_1 + a_2 + a_3) + a_1 a_3}{a_1 a_3};$$

$$r_{1,2} = \frac{-\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - 4\beta}}{2};$$

$$\alpha = a_1 + a_2 + a_3 - a_4, \quad \beta = a_1 a_3 - a_4 a_1 - a_4 a_2.$$

Система (2) включает три уравнения, записанные относительно шести температур. Это позволяет произвольно задавать три температуры и определять оставшиеся три неизвестные температуры из решения системы. Для унификации и автоматизации составления модели при произвольном задании трех независимых параметров система (2) дополняется тремя уравнениями связи, с помощью которых задаются известные значения параметров теплоносителей [4]:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \bar{t}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix} \quad (3)$$

или

$$\mathbf{B}\mathbf{T} = \mathbf{T}_0, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \bar{t}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix},$$

где \bar{t}_{10} , \bar{t}_{20} , \bar{t}_{30} – численные значения известных параметров теплоносителей.

Математическая модель второго этапа теплопередачи, описывающая фазовый переход в первом теплоносителе, для рассматриваемой на рис. 2 расчетной схемы трехпоточного теплообменного аппарата записывается в следующем виде [13]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = -\bar{a}_1 t_{m1} + \bar{a}_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_{m1} - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = -a_4 t_2 + a_4 t_3, \end{cases} \quad (5)$$

где $\bar{a}_1 = K_{12} / (r G_1)$; r – удельная теплота парообразования; t_{m1} – температура водяного пара; x_1 – степень сухости пара.

Для начальных условий $x_1|_{F=0} = x_{10}$, $t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_3|_{F=F_2} = t_{30}$ (F_2 – площадь поверхность теплообмена) решение системы (5) запишем в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где

$$b_{11} = 1;$$

$$b_{12} = \frac{(-S_1 e^{r_3 F_2} + S_2 e^{r_2 F_2} + S_1 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_2 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$b_{13} = \frac{(S_1 S_4 - S_2 S_3 - S_4 S_1 e^{r_2 F} + S_3 S_2 e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$d_1 = -t_{n1} \left[\frac{(-S_1 e^{r_3 F_2} + S_2 e^{r_2 F_2} + S_1 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_2 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} + \frac{(S_1 S_4 - S_2 S_3 - S_4 S_1 e^{r_2 F} + S_3 S_2 e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} \right];$$

$$b_{21} = 0;$$

$$b_{22} = \frac{(S_3 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_4 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$b_{23} = \frac{(S_3 S_4 e^{r_3 F} - S_3 S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$d_2 = t_{n1} \left[1 - \frac{(S_3 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_4 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} - \frac{(S_3 S_4 e^{r_3 F} - S_3 S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} \right];$$

$$b_{31} = 0;$$

$$b_{32} = \frac{(e^{r_3 F_2} e^{r_2 F} - e^{r_2 F_2} e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$b_{33} = \frac{(S_3 e^{r_3 F} - S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$d_3 = t_{n1} \left[1 - \frac{(e^{r_3 F_2} e^{r_2 F} - e^{r_2 F_2} e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} - \frac{(S_3 e^{r_3 F} - S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} \right];$$

$$S_1 = \frac{\bar{a}_1 S_3}{r_2}, \quad S_2 = \frac{\bar{a}_1 S_4}{r_3}, \quad S_3 = \left(1 - \frac{r_2}{a_4} \right),$$

$$S_4 = \left(1 - \frac{r_3}{a_4} \right),$$

$$r_{1,2} = \frac{-\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 + 4\beta}}{2}, \quad \alpha = a_2 + a_3 - a_4, \quad \beta = a_2 a_4.$$

Система (6) дополняется тремя уравнениями связи, с помощью которых задаются известные значения параметров теплоносителей:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ x_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \\ \bar{x}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где \bar{x}_{10} , \bar{t}_{20} , \bar{t}_{30} – численные значения известных параметров теплоносителей.

Модели (3) и (7) описывают изменение параметров теплоносителей в разных диапазонах значений температуры теплоносителя: первая – до, а вторая – после достижения им температуры насыщения. Полученные модели предлагается использовать для решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах при наличии фазового перехода в одном или нескольких теплоносителях.

Рассмотрим последовательность решения обратной задачи при скользящей границе фазового перехода. Считаем, что в качестве исходных данных заданы температуры теплоносителей на входе в аппарат. Для решения задачи предлагается использовать следующий алгоритм.

1. На первом этапе теплообменный аппарат рассматривается как одноступенчатая установка. Рассчитываются температуры теплоносителей на выходе из установки. Полученные значения сравниваются с температурами насыщения теплоносителей, определяется наличие фазового перехода в установке.

2. При наличии фазового перехода система условно делится на две зоны (подсистемы) по границе начала фазового перехода. Формируется матрица для расчета двухступенчатого аппарата: одна ступень описывается моделью без учета, а вторая – с учетом фазового перехода в теплоносителе.

3. Расчет по п. 2 повторяется при изменении границы между двумя зонами до достижения одинаковых значений температуры теплоносителя на границе между зонами с температурой насыщения.

Для демонстрации расчётных возможностей предлагаемого метода рассматривается пример определения наибо-

лее эффективной поверхности нагрева утилизационной установки дымовых газов для блока 800 МВт при сжигании природного газа. Значения расходов, теплоемкостей и начальных температур теплоносителей, которые были использованы при расчете, приведены в таблице.

Исходные данные для расчетного примера

Наименование параметра	Значение параметра		
	водяной пар	дымовые газы	охлаждающая вода
Расход G , кг/с	20,6	657,2	2143,3
Теплоемкость c , кДж/кг К	2,0	1,0	4,187
Скрытая теплота парообразования r , кДж/кг	2 200	—	—
Температура на входе t , °C	67,6	67,6	20
Температура насыщения t_n , °C [20]	46,9	—	—

Для рассматриваемой расчетной схемы сначала выполняется расчет процесса теплопередачи во второй части теплообменного аппарата (рис. 2) с фазовым переходом первого теплоносителя. Такая очередность определяется противоточным характером движения третьего теплоносителя на расчетной схеме, из-за чего для расчета первой части теплообменного аппарата требуется сначала определить температуру охлаждающей воды t'_{03} . На этом этапе производится подбор оптимальной поверхности теплообмена F_2 исходя из условия необходимости полной конденсации водяных паров (т.е. получения $x_1 = 0$). Данный расчет реализуется с помощью уравнения (7). Результаты расчетного анализа в виде расчетных зависимостей изменения температур и степени сухости теплоносителей вдоль поверхности теплообмена представлены на рис. 3.

Анализ полученной графической зависимости показывает, что полная конденсация водяных паров при заданных параметрах теплоносителей достигается при поверхности нагрева $F_2 = 2150 \text{ м}^2$.

На втором этапе производится расчет процесса теплопередачи в первой части теплообменного аппарата (рис. 2) без фазового перехода первого теплоносителя. Задача сводится к поиску поверхности теплооб-

мена F_1 исходя из необходимости снижения температуры водяных паров до точки насыщения (т.е. получения $t_1 = t_n = 46,9 \text{ °C}$). Данный расчет реализуется с помощью уравнения (3). Поскольку рассматриваемая схема теплообменного аппарата предполагает противоточную схему движения третьего (вода) и первых двух (пар и газы) теплоносителей, то в качестве начальной температуры воды в первой части теплообменного аппарата для уравнения (3) используется результат расчета температуры воды на выходе из второй части теплообменного аппарата, полученного по рис. 3 ($t_3 = t_{30к} = 27,0 \text{ °C}$). Результаты расчетного анализа в виде расчетных зависимостей изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена представлены на рис. 4.

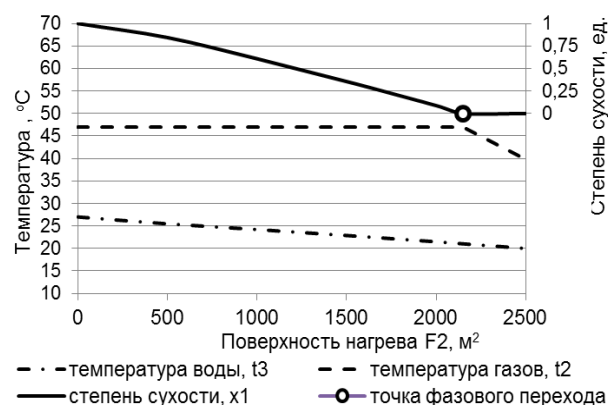


Рис. 3. Зависимости температур теплоносителей и степени сухости пара от площади теплообмена для второй зоны теплообмена с фазовым переходом

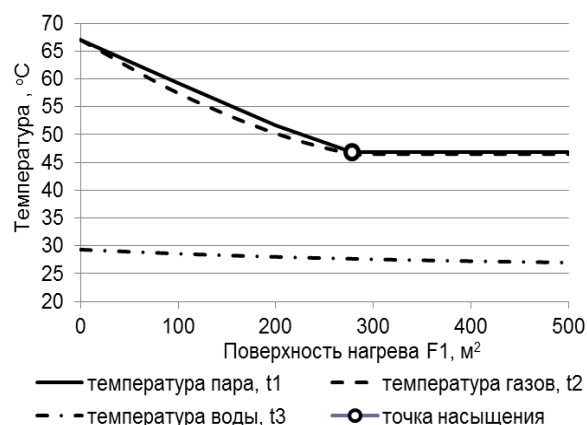


Рис. 4. Зависимости температур теплоносителей от площади теплообмена для первой зоны теплообмена без фазового перехода

Анализ полученной графической зависимости показывает, что охлаждение водяных паров до параметров насыщения дости-

гается при поверхности нагрева $F_1 = 278 \text{ м}^2$. Таким образом, площадь рассматриваемого теплообменного аппарата для принятых параметров теплоносителей составляет $278 + 2150 = 2428 \text{ м}^2$.

Выполненный расчетный анализ утилизационной установки дымовых газов показал, что предложенная методика решения обратной задачи теплопередачи в контактных аппаратах позволяет определить изменение температуры теплоносителей и процент сконденсированных водяных паров в каждой точке теплообменника, что обеспечивает выбор наиболее эффективных конструкции и режимов работы теплообменной установки.

Выводы. Разработанный матричный метод решения обратной задачи теплопередачи для многоступенчатых теплообменных аппаратов со скользящей границей фазовых переходов теплоносителей служит основой для создания более эффективных методов организации процессов теплопередачи в технологических установках различного назначения с произвольным числом теплоносителей с учетом фазового перехода.

Список литературы

1. **Майков В.П.** Введение в системный анализ. – М.: МГУИЭ, 2005. – 100 с.
2. **Цой П.В.** Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. – М.: МЭИ, 2005. – 568 с.
3. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
4. **Матричный** метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва и др. // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 62–69. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.062-069.
5. **Седлов А.С., Солодов А.П., Бухонов Д.Ю.** Получение конденсата из уходящих дымовых газов на экспериментальной установке ОАО ГРЭС-24 // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 5(43). – С. 76–77.
6. **Беспалов В.В., Беспалов В.И.** Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 56–59.
7. **Аронов И.З.** Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
8. **Установка** утилизации тепла дымовых газов / Н.Ф. Свиридов, Р.Н. Свиридов,

И.Н. Ивуков, Б.Л. Терк // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 8. – С. 29–31.

9. **Галустов В.С.** Утилизация теплоты дымовых газов // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 6. – С. 44.

10. **Андреев Е.И.** Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 172 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. **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.

13. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

14. **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.

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

16. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973. – 500 с.

17. **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.

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

19. **Барочкин А.Е., Жуков В.П., Касаткин К.А.** Матричная формализация расчета и анализ многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 70–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.070-076.

20. **Тепловой** расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: ЦКТИ, 1998. – 258 с.

References

1. Maykov, V.P. *Vvedenie v sistemnyy analiz* [Introduction to system analysis]. Moscow: MGUIE, 2005. 100 p.
2. Tsoy, P.V. *Sistemnye metody rascheta kraevykh zadach teplomassoperenosa* [System methods for calculating boundary value problems of heat and mass transfer]. Moscow: MEI, 2005. 568 p.
3. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 416 p.

4. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Bobrova, M.S., Belyakov, A.N., Shuvalov, S.I. *Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v teploobmennyykh apparatakh* [Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 62–69. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.062-069.
5. Sedlov, A.S., Solodov, A.P., Bukhonov, D.Yu. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 5(43), pp. 76–77.
6. Besspalov, V.V., Besspalov, V.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 56–59.
7. Aronov, I.Z. *Kontaktnyy nagrev vody produktami sgoraniya prirodnogo gaza* [Contact heating of water by natural gas combustion products]. Leningrad: Nedra, 1990. 280 p.
8. Sviridov, N.F., Sviridov, R.N., Ivukov, I.N., Terk, B.L. *Novosti teplosnabzheniya*, 2002, no. 8, pp. 29–31.
9. Galustov, V.S. *Energiya i menedzhment*, 2004, no. 6, p. 44.
10. Andreev, E.I. *Raschet teplo- i massoobmena v kontaktnyykh apparatakh* [Calculation of heat and mass transfer in contact devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 172 p.
11. Kasatkin, K.A., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Orlov, G.G. *Razrabotka matematicheskoy modeli mnogopotoknykh teploobmennyykh apparatov s uchetom fazovogo perekhoda v teplonositelyakh* [Development of a mathematical model of multi-current heat exchangers taking into account phase transition in heat carriers]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 61–67.
12. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Shumilova, M.S., Barochkin, E.V., Belyakov, A.N. *Matrichnyy metod rascheta slozhnykh teplomassoobmennyykh sistem s mnogokomponentnymi teplonositelyami* [The matrix method for calculating complex heat and mass transfer systems with multicomponent coolants]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 59–68.
13. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
14. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. *Issledovanie protsessa teploperedachi v mnogopotoknykh teploobmennyykh apparatakh* [Study of heat transfer process in multi-stream heat exchangers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, no. 11, pp. 116–119.
15. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operation Research: Objectives, Principles, Methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.
16. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Handbook of Mathematics (for Scientists and Engineers)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 500 p.
17. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981. 488 p.
18. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to Operation Research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.
19. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Kasatkin, K.A. *Matrichnaya formalizatsiya rascheta i analiz mnogopotoknykh mnogostupenchatykh teploobmennyykh apparatov so slozhnoy konfiguratsiei potokov* [Matrix formalization of calculation and analysis of multi-threaded multi-stage heat exchangers with a complex flow configuration]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 1, pp. 70–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.070-076.
20. *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal calculation of boilers (Normative method)]. Saint-Petersburg: TsKTI, 1998. 258 p.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **11**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 10 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черными**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **11**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 5

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 13.09.2021. Выход в свет 31.06.2021. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 9,62. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

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