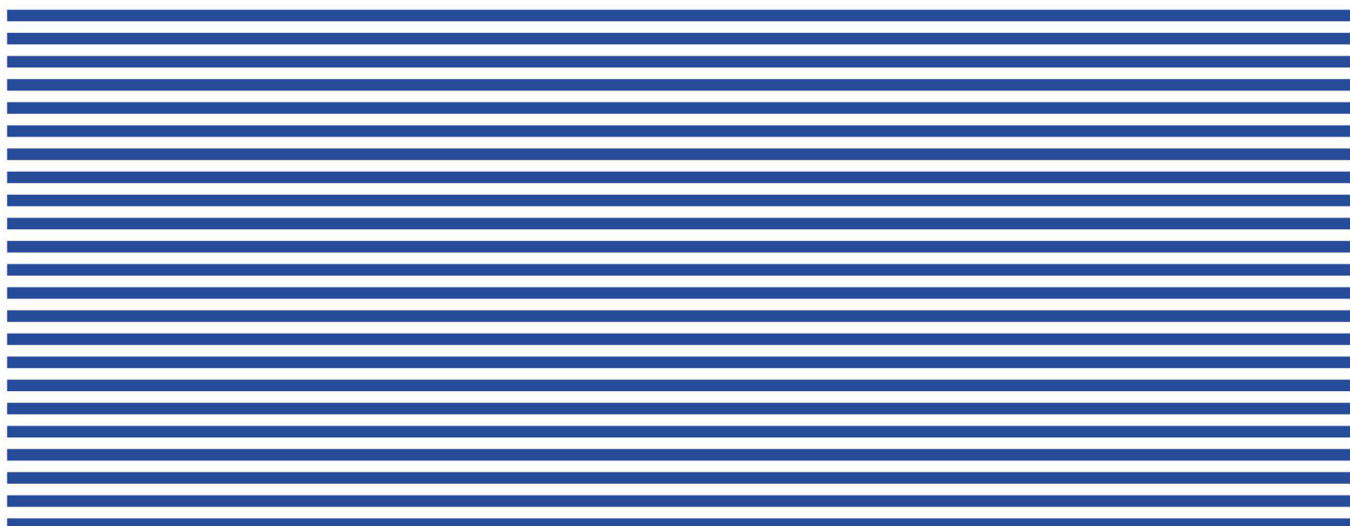




ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



2024

№ 1 (42)



В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям перечня ВАК:

- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника
 - 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
 - 2.4.4. Электротехнология и электрофизика
 - 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерения)
 - 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
-
- 2.4.1. Theoretical and Applied Electrical Engineering
 - 2.4.2. Electrical Complexes and Systems
 - 2.4.4. Electrotechnology and Electrophysics
 - 2.2.4. Measuring Instruments and Methods
 - 2.2.11. Information-Measuring and Control Systems

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (42)
Март 2024

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией
Минобрнауки России

Главный редактор	АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ответственный секретарь	МОЛОТ СВЕТЛАНА ВИКТОРОВНА старший преподаватель, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Редакционная коллегия

А.А. БАЗАРОВ	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
В.Г. ГОЛЬДШТЕЙН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Ю.Б. КАЗАКОВ	д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.А. ФОМИН	д.т.н., доцент СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (42)
March 2024

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication
by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

Editor-in-Chief

ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Assistant to the Editor-in-Chief

BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Chief Executive Officer

MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA

Senior Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Editorial Board Members

A.A. BAZAROV

Dr. Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

V.V. VAKHNINA

Dr. Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti

V.G. GOLDSTEIN

Dr. Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

Yu.V. GULYAEV

Dr. Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering
and Electronics of RAS, Moscow

V.B. DEMIDOVICH

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»,
St. Petersburg

Yu.B. KAZAKOV

Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo

A.N. MAKAROV

Dr. Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver

G.A. MOROZOV

Dr. Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Yu.P. PERELIGIN

Dr. Sc., Professor, Penza State University, Penza

A.F. REZCHIKOV

Dr. Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision
Mechanics and Control of RAS, Saratov

I.V. RODIONOV

Dr. Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov

F.N. SARAPULOV

Dr. Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

Yu.B. TOMASHEVSKY

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

A.A. FOMIN

Dr. Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.N. KHMELEV

Dr. Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

V.A. TSAREV

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Коломейцев В.А., Ковряков П.В., Дрогайцева О.В. Интенсификация процесса термообработки листовых диэлектрических материалов в СВЧ устройствах на основе прямоугольного волновода	5
Родионов И.В., Перинская И.В., Куц Л.Е., Устинов П.Н. Формирование пористого порошкового Al_2O_3 покрытия способом лазерного импульсного спекания	14
Давыдов Д.А., Бунтаков Д.В. Увеличение поверхностной твердости металла воздействием электроискрового легирования	24
Максудов Д.В. Математическое моделирование озонатора сотовой структуры	29

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Зиновьева Е.Г., Кравченко Г.А., Калинин А.Г., Михадаров Д.Г., Ефремов Д.А. Влияние напряженности электрического поля на удельную электропроводность теплоносителей	37
---	----

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Макартичян С.В., Богале М.А., Коновалова Л.А., Вершинин А.В. Интеллектуальная поддержка выбора датчиков информационно-измерительных систем на примере уровнемеров	43
--	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Кузнецов П.А., Шкода И.О., Ладин А.В., Кузнецов И.Г., Богданова В.В. Анализ современных решений в области телеметрии трансформаторных подстанций 10 (6) Кв	54
Максимов С.П., Кузнецов П.А., Степанов С.Ф. Техническая эффективность организационно-технических мероприятий по борьбе с гололедно-изморозевыми отложениями на проводах воздушных линий электропередачи	61
Байбиков И.Ф., Стариков А.В. Синтез регулятора положения, обеспечивающего большое быстродействие следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем	70
Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н., Пудовинников Р.Н. Эмиссия гармоник тока намагничивания блочного трансформатора в цепи статорных обмоток синхронного генератора при геомагнитных возмущениях	77
Артюхов И.И., Николаев М.Д. Особенности функционирования СВЧ-установки конвейерного типа при колебаниях параметров питающей сети	87

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Миронов Юрий Михайлович (1937–2023)	95
К сведению авторов	97

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

- Kolomeytsev V.A., Kovryakov P.V., Drogaytseva O.V.** Intensification of the process of heat treatment of sheet dielectric materials in microwave devices based on rectangular waveguide 5
- Rodionov I.V., Perinskaya I.V., Kuts L.E., Ustinov P.N.** Formation of porous Al_2O_3 powder coating by laser pulse sintering 14
- Davydov D.A., Buntakov D.V.** Increasing the surface hardness of metal by electrospark alloying 24
- Maksudov D.V.** Mathematical modeling of a honeycomb ozone generator 29

THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

- Zinovjeva E.G., Kravchenko G.A., Kalinin A.G., Mikhadarov D.G., Efremov D.A.** Effect of the electric field strength on specific electrical conductivity of coolants 37

INFORMATION MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Makartichyan S.V., Bogale M.A., Konovalova L.A., Vershinin A.V.** Intelligent support for the sensors applied in information-measuring systems using the example of level gauges 43

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- Kuznetsov P.A., Shkoda I.O., Ladin A.V., Kuznetsov I.G., Bogdanova V.V.** Analysis of modern solutions in the field of telemetry transformer substations 10 (6) kV 54
- Maksimov S.P., Kuznetsov P.A., Stepanov S.F.** Efficiency of organizational and technical measures applied against icy-rime deposits on overhead power lines 61
- Baybikov I.F., Starikov A.V.** Synthesis of the position controller providing high speed operation of the servo drive with a synchronous servo motor 70
- Vakhnina V.V., Kuvshinov A.A., Chernenko A.N., Pudovinnikov R.N.** Emission of magnetizing current harmonics of a block transformer in the stator winding circuit of a synchronous generator under geomagnetic disturbances 77
- Artyukhov I.I., Nikolaev M.D.** Operation of multigenerator conveyor microwave installation under conditions of the supply network changing parameters 87

IN MEMORY OF THE SCIENTIST

- Mironov Yuri Mikhailovich** (1937-2023) 95

- Information for Authors 97

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.372.8

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

В.А. Коломейцев, П.В. Ковряков, О.В. Дрогайцева

INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF SHEET DIELECTRIC MATERIALS IN MICROWAVE DEVICES BASED ON RECTANGULAR WAVEGUIDE

V.A. Kolomeytsev, P.V. Kovryakov, O.V. Drogaytseva

На основе аналитического решения задачи электродинамики с использованием продольной Х-поляризации электромагнитного поля проведено исследование влияния трансформации электромагнитного (ЭМ) поля в воздушной прослойке прямоугольного волновода (ПрВ) с диэлектрической пластинкой в Е-плоскости на распределение энергии электрического поля в пластине в доминантном диапазоне длин волн и установлено, что максимум данной энергии достигается на длине волны $\lambda_{тр.1}$ на которой происходит переход быстрой волны, фазовая скорость которой больше скорости света – $v_f < c$ в медленную – $v_f > c$. Показано, что равенство рабочей длины и $\lambda_{тр.1}$ является основным критерием оптимизации конструкции рабочей камеры на основе ПрВ, в которой достигается предельно допустимый уровень интенсификации СВЧ нагрева листового материала.

Ключевые слова: прямоугольный волновод; энергия электрического поля; доминантный диапазон длин волн; продольная Х-поляризация поля; длина волны трансформации поля; собственные электродинамические параметры; критические длины волн; коэффициент замедления волны; быстрая и медленная основная продольная волна; принцип поляризационной двойственности

Based on an analytical solution to the problem of electrodynamics using longitudinal X-polarization of the electromagnetic field, a study was carried out of the influence of the transformation of the electromagnetic (EM) field in the air gap of a rectangular waveguide (RW) with a dielectric plate in the E-plane on the distribution of electric field energy in the plate in the dominant wavelength range and established that the maximum of this energy is achieved at wavelength $\lambda_{tr.1}$ at which a transition occurs from a fast wave, the phase speed of which is greater than the speed of light – $v_f < c$ into a slow one – $v_f > c$. It is shown that the equality of the working length and $\lambda_{tr.1}$ is the main criterion for optimizing the design of a working chamber based on RW, in which the maximum permissible level of intensification of microwave heating of sheet material is achieved.

Keywords: rectangular waveguide; electric field energy; dominant wavelength range; longitudinal X-polarization of the field; field transformation wavelength; own electrodynamic parameters; critical wavelengths; wave deceleration coefficient; fast and slow main longitudinal wave; principle of polarization duality

Рассмотрим электродинамические свойства рабочей камеры (РК), представляющей собой прямоугольный волновод (ПрВ), в центре широкой стенки которого расположена диэлектрическая пластина (рис. 1).

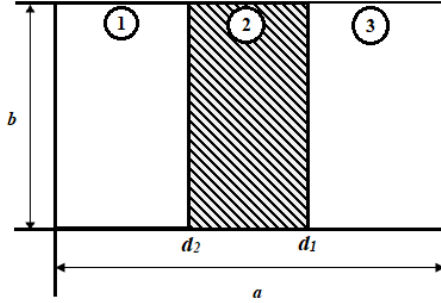


Рис. 1. Поперечное сечение прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в центре широкой стенки:
1, 3 – воздушная среда,
2 – диэлектрическая пластина

Данная конструкция РК широко используется для СВЧ термообработки листовых диэлектрических материалов [1], при этом работа осуществляется в одномодовом режиме на основной волне РК.

Исследования диапазонных свойств собственных электродинамических параметров и структуры ЭМ поля проводятся

на основе аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики для ПрВ с диэлектрической пластиной в Е-плоскости в центре широкой стенки волновода. Решение получено при использовании продольной поляризации ЭМ поля, при которой решаются два скалярных новых уравнений Гельмгольца для составляющих ЭМ поля – E_x, H_x :

$$\nabla^2 E_{xq}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon_q \mu \frac{\partial^2 E_{xq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0; \quad (1)$$

$$\nabla^2 H_{xq}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon_q \mu \frac{\partial^2 H_{xq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0,$$

где ε, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды; $\vec{r}$ – радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в пространстве; τ – время; q – номер среды (рис. 1). Как показано в работах [2, 3], решение системы независимых волновых уравнений (1) может быть представлено в виде суперпозиции E и H типов волн:

$$\begin{aligned} E_{xq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{xqmn}(x, y, z) e^{j(\omega \tau - \beta_{mn} z)}; \\ H_{xq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} H_{xqmn}(x, y, z) e^{j(\omega \tau - \beta_{mn} z)}; \end{aligned} \quad (2)$$

при этом

$$\begin{aligned} E_{xqmn}(x, y) &= (a_{1qm} \cos(k_{xm} x) + b_{1qm} \sin(k_{xm} x)) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right); \\ H_{xqmn}(x, y) &= (a_{2qm} \cos(k_{xm} x) + b_{2qm} \sin(k_{xm} x)) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Заметим, что соотношения (3) удовлетворяют граничным условиям на металлической поверхности волновода при $y = 0, b$ [4]. Остальные компоненты ЭМ поля опре-

деляются на основе принципа поляризационной двойственности [5, 6] через компоненты поля E_x, H_x (соотношения (2), (3)) посредством уравнений:

$$\begin{aligned}
 E_{yq} &= \frac{1}{K_{1x}^2} \left(-\frac{\partial^2 E_{xq}}{\partial x \cdot \partial y} + j w \mu \cdot \frac{\partial H_{xq}}{\partial z} \right); \\
 H_{yq} &= \frac{1}{K_{1x}^2} \left(j w \varepsilon_q \frac{\partial E_{xq}}{\partial z} + \frac{\partial^2 H_{xq}}{\partial x \cdot \partial y} \right); \\
 E_{zq} &= \frac{1}{K_{2x}^2} \left(\frac{\partial^2 E_{xq}}{\partial x \cdot \partial y} + j w \mu \cdot \frac{\partial H_{xq}}{\partial y} \right); \\
 H_{zq} &= \frac{1}{K_{1x}^2} \left(-j w \varepsilon_q \cdot \frac{\partial E_{xq}}{\partial y} + \frac{\partial^2 H_{xq}}{\partial x \cdot \partial z} \right).
 \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношения (2)-(4) позволяют провести исследования электродинамических свойств независимо для E ($E_x \neq 0$, $H_x \neq 0$) и H ($E_x \neq 0$, $H_x \neq 0$) типов волн, для этого необходимо удовлетворить соотношения (3) граничным условиям на металлической поверхности волновода при $x = 0$ и

$x = a$ и на границе раздела сред для конкретного типа волн.

Для разработчиков СВЧ нагревательных устройств волноводного типа интерес представляют электродинамические свойства основной волны РК, на которой проводится термообработка. Как показано в работах [4, 7], основной волной ПрВ с диэлектрической пластиной в E -плоскости является продольная волна H_{10} , имеющая максимальное значение критической длины волны. Первым высшим типом является продольная волна H_{20} . Обе волны, определяющие доминантный диапазон длин волн, являются невырождаемыми волнами ($n = 0$). Согласно соотношениям (3)-(4), данные волны имеют одну составляющую электрического поля – $E_{y,q}(\vec{r}, z)$. Это существенно упрощает решение задачи интенсификации СВЧ нагрева листовых материалов в данных устройствах. Подставим второе соотношение (3) в первое уравнение (4), получим значение $E_{y,q}$ для Н-типов волн ($E_x = 0$; $H_x \neq 0$):

$$E_{yq}(x, y) = \frac{\beta mn}{K_{1x}} w \mu (a_2 \cos(K_{xmq} x \cdot b_{2qm} \sin(K_{xmq} x)) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{6} y\right). \quad (5)$$

Составляющая $E_{y,q}$ тангенциальна металлической поверхности волновода при $x = 0$ и $x = a$ и поверхности раздела сред при $x = d_1$ и $x = d_2$, что упрощает задание и удовлетворение граничных условий, которые требуют, чтобы

$$\begin{aligned}
 E_{x1}|_{x=0} &= E_{x3}|_{x=0} = 0; \\
 E_{x1} &= E_{x2}|_{x=d_2}; \quad E_{2x} = E_{3x}|_{x=d_1}.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Удовлетворяя соотношения (5) граничным условиям (6) и, учитывая симметричность составляющей $E_{y,q}$ основного типа волны H_{10} относительно $x = a/2$, получим структуру электрического поля в каждой из сред, заполняющих РК:

$$E_{y1}(x) = -j \frac{\mu c}{K_{3AM}} b_1 \sin(k_{x1} x);$$

$$E_{y2}(x) = -j \frac{\mu c}{K_{3AM}} b_2 \frac{\cos\left(k_{x2}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right)}{\sin\left(k_{x2} \frac{a}{2}\right)}; \quad (7)$$

при $K_{3AM} < 1$;

$$E_{y3}(x) = -j \frac{\mu c}{K_{3AM}} b_1 \sin(k_{x1}(x - a)),$$

где $K_{3AM} = c / v_\phi$ – коэффициент замедления волны; k_{x1} , k_{x2} – волновые числа, определяющие электрическое поле в воздушной прослойке РК и в диэлектрической пластине. Соотношения (7) определяют структуру электрического поля быстрой продольной волны H_{10} при $K_{3AM} < 1$. В работах [7, 8] показано, что в ПрВ с диэлектриче-

ской пластиной в Е-плоскости могут распространяться не только быстрые, но и медленные волны. При этом, при переходе быстрой волны в медленную, начинается трансформация ЭМ поля в поперечном сечении волновода, при котором электрическое поле в менее плотной среде (в воздушной прослойке) стягивается на поверхности более плотной среды (диэлектрическая пластина), частично проникая в нее. Принципиальным моментом медленной волны является то, что волновое число K_{x1} , определяющее структуру поля в воздушной прослойке, является мнимой величиной – $K_{x1} = -j |K_{x1}|$. Подставляя данное значение K_{x1} в соотношения (7), получим структуру электрического поля в диапазоне длин волн, в котором распространяется медленная продольная волна H_{10} :

$$\begin{aligned} E_{y1}(x) &= \frac{\mu c b_2}{K_{3AM}} sh(k_{x1} x); \\ E_{y2}(x) &= -j \frac{\mu c b_2}{K_{3AM}} \frac{\cos\left(k_{x2}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right)}{\sin\left(k_{x2} \frac{a}{2}\right)}; \end{aligned} \quad (8)$$

при $K_{3AM} > 1$;

$$E_{y3}(x) = -\frac{\mu c b_1}{K_{3AM}} sh(k_{x1}(x - a)).$$

Из соотношений (8) следует, что электрическое поле в диэлектрической пластине, как и для быстрых волн, определяется периодическими тригонометрическими параболическими функциями [8], в то время как в воздушной прослойке РК поле определяется гиперболическими функциями, которые носят затухающий от поверхности раздела сред характер. Заметим, что соотношения (7), (8) позволяют определить среднюю энергию электрического поля в поперечном сечении каждого диэлектрического слоя в доминантном диапазоне длин волн – $\lambda_{кр.2} \leq \lambda \leq \lambda_{кр.1}$. Это позволит определить степень влияния трансформации электрического поля в воздушной среде РК на процесс интенсификации СВЧ нагрева и определить оптимальную длину волны, на которой достигается ее максимум.

Для определения среднего значения энергии электрического поля $\bar{W}_{\varepsilon q}(x)$ необходимо вычислить интеграл [8]:

$$\bar{W}_{\varepsilon q}(x) = \frac{\varepsilon_q}{d_q} \int_{x_{q-1}}^{x_q} E_{xq}(x) \cdot E_{xq}^*(x) dx; \quad (9)$$

где d_q – толщина диэлектрического слоя; $E_{xq}^*(x)$ – комплексно-сопряженное значение величины $E_{xq}(x)$. Подставляя соотношения (7), (8) в соотношение (9), получим:

$$\begin{aligned} \bar{W}_{\varepsilon 1}(\lambda) &= \varepsilon_1 b_1^2 \left(\frac{\mu c}{K_{3AM}} \right)^2 \left(\frac{sh(k_{x1}(\lambda)(a - d))}{k_{x1}(\lambda)(a - d)} - 1 \right) \cdot \frac{1}{2}; \quad \text{при } K_{3AM} < 1; \\ \bar{W}_{\varepsilon 1}(\lambda) &= \varepsilon_1 b_1 \left(\frac{\mu c}{K_{3AM}} \right)^2 \left(\frac{sh(|k_{x1}(\lambda)|(a - d))}{|k_{x1}(\lambda)|(a - d)} - 1 \right) \cdot \frac{1}{2}; \quad \text{при } K_{3AM} > 1; \\ \bar{W}_{\varepsilon 2}(\lambda) &= \varepsilon_2 b_2^2 \left(\frac{\mu}{K_{3AM}} \right)^2 \left(1 - \frac{\sin(k_{x2}(\lambda)d)}{k_{x2}(\lambda)d} \right) \cdot \frac{0,5}{\cos^2\left(k_{x2}(\lambda)\frac{a}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения (10) позволяют определить диапазонные свойства энергии электрического поля в каждом диэлектрическом слое, заполняющих РК в доминантном диа-

пазоне длин волн, а также длину волны, на которой достигается максимум $\bar{W}_{\varepsilon}$ в нагревательной пластине. Для этого необходимо определить диапазонные ха-

рактеристики всех электродинамических параметров, входящих в соотношения (10). В работе [7] получено дисперсионное урав-

$$\frac{tg\eta}{\eta} = \frac{a-d}{d} \frac{1}{\left\{0.25 \left(\frac{a-d}{d}\right)^2 \eta^2 \frac{tg^2\xi}{\xi^2} - 1\right\}} \frac{tg\xi}{\xi}; \text{ при } K_{x1}^2 > 0;$$

(11)

$$\frac{tg\eta}{\eta} = \frac{a-d}{d} \frac{1}{\left\{0.25 \left(\frac{a-d}{d}\right)^2 \eta^2 \frac{th^2|\xi|}{|\xi|^2} - 1\right\}} \frac{th|\xi|}{|\xi|}; \text{ при } K_{x1}^2 < 0;$$

где $\xi = K_{x1} \frac{a-d}{2}$; $\eta = K_{x2} d$; K_{x2} – волновое число, определяющее структуру ЭМ поля в диэлектрической пластине. В данной работе для удобства расчета собственных электродинамических параметров используются дисперсионные уравнения для каждой из сред, являющиеся следствием решения волновых уравнений Гельмгольца методом частичных областей и разделения переменных [9]:

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = K_{x1}^2 + \beta_{10}^2; \quad q = 1;$$

$$\varepsilon'_2 \cdot \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = K_{x2}^2 + \beta_{10}^2; \quad q = 2.$$

Уравнения (12) позволяют определить величины η и ξ дисперсионного уравнения (11) с учетом функционального назначения исследуемого параметра, что упрощает определение его диапазонной характеристики.

Решение уравнения (11) начнем с определения критических длин волн основного и первого высшего типов волн $H - \lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$. Условием определения данных параметров является $\beta_{10} = 0$. Из уравнений (12) следует:

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{a-d}{2}; \quad \eta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 d}. \quad (13)$$

Подставляя полученные значения η и ξ в первое дисперсионное уравнения (11), решая его методом последовательных приближений, определим значения критических длин волн основного – $\lambda_{кр.1}$ и первого высшего типов волн. Расчет проводился для наиболее распространенного на частоте

наение, позволяющее решить данную задачу, которое для основной волны H_{10} имеет следующий вид:

$\vartheta = 2450$ МГц прямоугольного волновода сечением 45×90 мм. На рис. 2 приведены дисперсионные зависимости $\lambda_{кр.1}/a$ (d/a) для различных ε'_2 пластины, а на рис. 3 – аналогичные зависимости $(\lambda_{кр.1}/a) \cdot (\varepsilon'_2)$ и $(\lambda_{кр.2}/a) \cdot (\varepsilon'_2)$ для различных d/a . Необходимо заметить, что значения $\lambda_{кр.1}$ находятся в области распространения быстрой основной волны H_{10} и, соответственно, $\lambda_{кр.2}$ в зоне распространения медленной волны H_{20} . При этом первый корень первого дисперсионного уравнения (11) определяет величину $\lambda_{кр.1}$, а второй корень второго уравнения (11) – $\lambda_{кр.2}$. Значения $\lambda_{кр.1}(\lambda)$ и $\lambda_{кр.2}(\lambda)$ однозначно определяют коэффициент широкополосности РК – $K_{шир} = \lambda_{кр.1}/\lambda_{кр.2}$. При этом коэффициент $K_{шир}$ ПрВ с диэлектрической пластиной в центре широкой стенки выше $K_{шир}$ ПрВ с двухслойным заполнением. Это связано с тем, что при трехслойном заполнении пластина находится в максимуме электрического поля основной волны H_{10} , что приводит к существенному увеличению $\lambda_{кр.1}$ и в минимуме первого высшего типа H_{20} , что практически не влияет на величину $\lambda_{кр.2}$. Это приводит к увеличению величины $K_{шир}$. Так, для $d/a = 0,05$, широкополосность ПрВ достигает $K_{шир} = 6,5$, что превышает значение $K_{шир}$ квазистационарного волновода П- или Н-типа.

Как следует из соотношений (10), амплитуда $\bar{W}_{\varepsilon q}$ зависит от коэффициента затухания основной продольной волны H_{10} – $K_{ЗАМ} = c / v_{\phi.1} = \beta C / \omega$. Рассмотрим методику определения данного коэффициента. Используя дисперсионные уравнения (12), определим волновые числа ξ и η :

$$K_{x1} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - K_{3AM}^2}; \quad K_{x2} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_2 - K_{3AM}^2}; \quad \text{при } K_{3AM} \leq 1; \quad (14)$$

$$K_{x1} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{K_{3AM}^2 - 1}; \quad K_{x2} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_2 - K_{3AM}^2}; \quad \text{при } K_{3AM} > 1.$$

Подставив соотношения (14) в выражения ξ и η , входящие в дисперсионное уравнение (11), получим

$$\xi = K_{x1} \cdot \frac{a-d}{2}; \quad \eta = K_{x2} \cdot d. \quad (15)$$

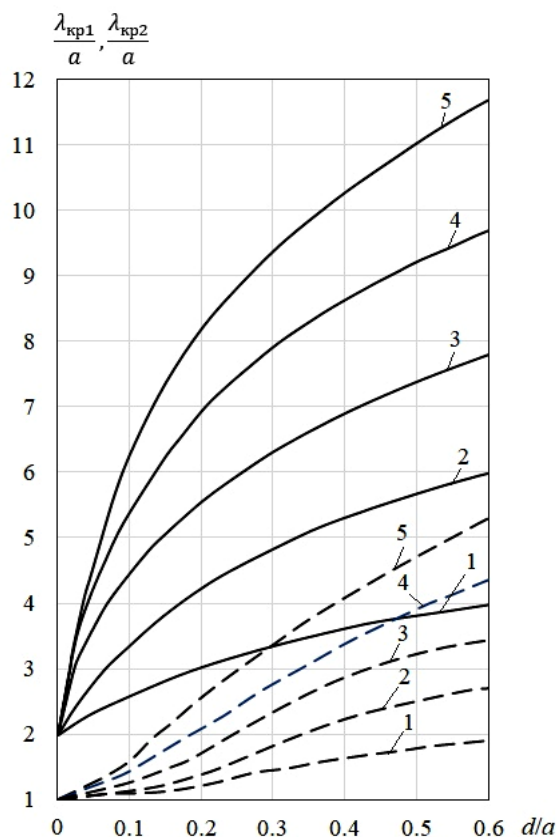


Рис. 3. Зависимости $\lambda_{кр.1}/a$ (d/a) (сплошные кривые) и $\lambda_{кр.2}/a$ (d/a) (пунктирные кривые) для различных ϵ'_2 пластины:
кривые 1 – $\epsilon'_2 = 2$; кривые 2 – $\epsilon'_2 = 9$;
кривые 3 – $\epsilon'_2 = 16$; кривые 4 – $\epsilon'_2 = 25$;
кривые 5 – $\epsilon'_2 = 36$

Подставляя соотношения (15) в уравнение (11) и решая его методом последовательных приближений, получим для заданного значения λ соответствующее значение K_{3AM} . Необходимо заметить, что на первом этапе определения K_{3AM} необходимо определить длину волны $\lambda_{тр.1}$, на которой происходит переход быстрой волны H_{10} в медленную. Условием определения $\lambda_{тр.1}$ является $K_{3AM} = 1$. Подстав-

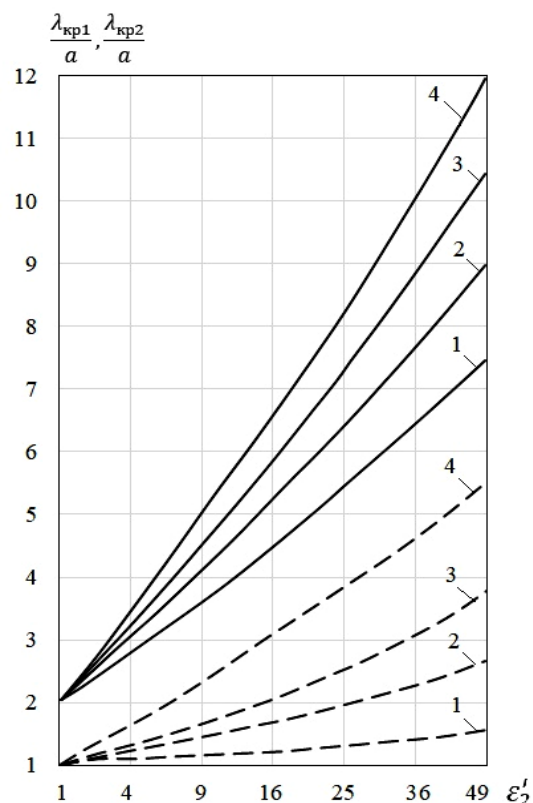


Рис. 4. Зависимости $\lambda_{кр.1}/a$ (ϵ'_2) (сплошные кривые) и $\lambda_{кр.2}/a$ (ϵ'_2) (пунктирные кривые) для различных d/a :
кривые 1 – $d/a = 0,1$; кривые 2 – $d/a = 0,2$;
кривые 3 – $d/a = 0,3$;
кривые 4 – $d/a = 0,5$

ля значения ξ и η при $K_{3AM} = 1$ в уравнение (11), определим значение $\lambda_{тр.1}$ для заданного ПрВ и ϵ'_2 , d -пластины. Значение $\lambda_{тр.1}$ позволяет определить диапазон распространения быстрой волны – $\lambda_{тр.1} \leq \lambda < \lambda_{кр.1}$ и медленной волны – $\lambda_{кр.2} \leq \lambda < \lambda_{тр.1}$. В табл. 1 приведены дисперсионные зависимости $K_{3AM}(\lambda)$ для ПрВ сечением 45×90 мм. Расчеты проведены

для диэлектрической пластины толщиной $d/a = 0,4$ для $\varepsilon'_2 = 9; 16; 25$. Исследовалась зона распространения медленной волны $H_{10} - \lambda_{кр.2} \leq \lambda < \lambda_{тр.1}$ доминантного диапазона длин волн. Приведены все электродинамические параметры, определяющие среднее значение энергии

электрического поля $\bar{W}_{эq}$ в поперечном сечении каждого диэлектрического слоя, что позволяет определить длину волны, на которой достигается предельно допустимый уровень $\bar{W}_{э2}$, определяющий удельную плотность тепловых источников в нагреваемом пластинчатом материале.

Таблица 1

$\varepsilon'_2 = 9$	$\lambda, \text{ см}$	43.7	40	35	30	25	22.5	20	19	18.1
	η	1.47	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.55	1.37
	ξ	0	0.6	1.46	2.27	2.36	3.62	4.0	4.49	4.97
	$K_{зам}$	1.0	1.2	1.8	2.2	2.5	2.57	2.65	2.7	2.8
$\varepsilon'_2 = 16$	$\lambda, \text{ см}$	59.8	55	50	45	40	35	30	25	20
	η	1.47	1.59	1.59	1.59	1.73	1.73	1.84	2.06	2.09
	ξ	0	0.92	1.4	1.79	2.16	2.76	3.46	4.56	5.03
	$K_{зам}$	1.0	1.7	2.28	2.55	2.68	3.0	3.2	3.35	3.44
$\varepsilon'_2 = 25$	$\lambda, \text{ см}$	75.5	65	60	55	50	45	40	35	29.7
	η	1.47	1.59	1.95	2.06	2.13	2.14	2.16	2.31	2.5
	ξ	0	0.22	0.44	1.08	1.41	1.89	2.81	3.3	4.5
	$K_{зам}$	1.0	1.1	1.22	1.74	2.2	2.7	3.35	3.53	3.9

Особый интерес в достижении поставленной цели представляет исследование распределения энергии электрического поля в диэлектрической пластине $\bar{W}_{э2}(\lambda)$, в зоне распространения медленной волны H_{10} . Заметим, что в зоне распространения быстрой волны H_{10} трансформация ЭМ поля в воздушной среде невозможна. При этом в данной зоне $\bar{W}_{э1}(\lambda) \neq 0$ и не наблюдается перераспределение энергии электрического поля между диэлектрическими слоями. Проведем исследование диапазонных свойств энергии $\bar{W}_{эq}(\lambda)$ в зоне распространения волны H_{10} . Для этого введем безразмерные параметры:

$$\begin{aligned} K_2(\lambda) &= \frac{\bar{W}_{э2}(\lambda)}{\bar{W}_{э2}(\lambda_{кр.1})}; \\ K_1(\lambda) &= \frac{\bar{W}_{э1}(\lambda)}{\bar{W}_{э1}(\lambda_{кр.2})}. \end{aligned} \quad (16)$$

Параметры $K_2(\lambda)$ и $K_1(\lambda)$ позволяют упростить анализ диапазонного изменения $\bar{W}_{эq}(\lambda)$

в диэлектрической пластине и воздушной прослойке ПрВ. Подставляя в отношения (10) данные $K_{зам}$, ξ и η , приведенные в таблице, определим диапазонные характеристики энергии $\bar{W}_{э2}(\lambda)$ и $\bar{W}_{э1}(\lambda)$ в зоне распространения медленной волны. В табл. 2 приведены результаты расчета $K_1(\lambda)$ и $K_2(\lambda)$ ПрВ сечением 45×90 мм с диэлектрической пластиной толщиной $d/a = 0.4$ для $\varepsilon'_2 = 9; 16; 25$.

Из приведенных в таблице данных следует, что коэффициент $K_1(\lambda)$ увеличивается при уменьшении λ , а коэффициент $K_2(\lambda)$ при этом уменьшается. Максимальное значение K_1 достигается при $\lambda = \lambda_{кр.2}$, а K_2 – при $\lambda = \lambda_{тр.1}$. Это свидетельствует о том, что в зоне распространения медленной продольной волны H_{10} происходит не только трансформация ЭМ поля в воздушной прослойке ПрВ, но и перераспределение энергии электромагнитного поля между диэлектрическими слоями, что существенно влияет на распределение тепловых источников в нагреваемой пластине.

Таблица 2

$\varepsilon'_2 = 9$	$\lambda, \text{ см}$	43.7	40	35	30	25	22.5	20	19	18.1
	$K_2(\lambda)$	1.0	0.37	0.16	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05
	$K_1(\lambda)$	0	0.04	0.07	0.14	0.27	0.37	0.47	0.75	1.0
$\varepsilon'_2 = 16$	$\lambda, \text{ см}$	59.7	55	50	45	40	35	30	25	20
	$K_2(\lambda)$	1.0	0.18	0.11	0.08	0.05	0.04	0.03	0.026	0.02
	$K_1(\lambda)$	0	0.05	0.06	0.09	0.1	0.19	0.5	0.75	1.0
$\varepsilon'_2 = 25$	$\lambda, \text{ см}$	75.5	65	60	55	50	45	40	35	29.7
	$K_2(\lambda)$	1.0	0.16	0.07	0.04	0.03	0.026	0.02	0.015	0.01
	$K_1(\lambda)$	0	0.05	0.09	0.1	0.11	0.14	0.24	0.45	1.0

При этом максимальная концентрация энергии $\bar{W}_{32}$ наблюдается на длине волны, на которой начинается переход быстрой волны в медленную, то есть при $\lambda = \lambda_{\text{тр.1}}$. В зоне распространения быстрой волны энергия $\bar{W}_{31} \neq 0$, что при постоянстве подводимой СВЧ мощности в РК приводит к уменьшению $\bar{W}_{32}(\lambda)$.

Таким образом, проведенные в работе исследования диапазонных свойств собственных электродинамических параметров и структуры ЭМ поля ПрВ с диэлектрической пластиной в центре широкой стенки волновода позволили определить

длину волны, на которой достигается предельно допустимый уровень энергии электрического поля в пластине. Это длина волны $\lambda_{\text{тр.1}}$, на которой происходит переход быстрой основной волны H_{10} в медленную. Условие равенства данной волны и рабочей длины волны, на которой осуществляется термообработка, $\lambda_{\text{раб.}} = \lambda_{\text{тр.1}}$, является основным критерием оптимизации конструкции РК СВЧ нагревательных устройств волноводного типа, предназначенных для термообработки листовых материалов, позволяющая достичь максимального уровня интенсификации СВЧ нагрева.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СВЧ-энергетика: в 3 т. / под ред. Э. Окресса. Т. 2. Москва: Мир, 1971. 272 с.

2. Егоров Ю.В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. Москва: Энергия, 1967. 216 с.

3. Баринов Д.А., Коломейцев В.А., Посадский В.М. Определение собственных электродинамических параметров прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим заполнением // Радиотехника. 2014. № 10. С. 41-46.

4. Пименов Ю.В., Вольман В.И. Техническая электродинамика. Москва: Радио и связь, 2000. 536 с.

5. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. Москва: Высшая школа, 1992. 364 с.

6. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением / Д.А. Баринов и др. // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 46-57.

7. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной расположенной в центре широкой стенки волновода / Д.А. Баринов, Д.В. Гапонов, В.А. Коломейцев, С.А. Тосканов // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 107-114.

8. Анго А. Математика для электроники и радиоинженеров. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 543 с.

9. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Наука, 1976. 576 с.

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, г. Саратов, Россия

Ковряков Павел Валерьевич – соискатель кафедры «Радиотехника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дрогайцева Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav A. Kolomeytsev – Dr. Sci. Tech., Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Pavel V. Kovryakov – PhD student, Department of Radio Engineering and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga V. Drogaytseva – PhD, Associate Professor, Department of Radio Engineering and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.01.24, принята к опубликованию 14.03.24

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО ПОРОШКОВОГО Al_2O_3 ПОКРЫТИЯ
СПОСОБОМ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСНОГО СПЕКАНИЯ****И.В. Родионов, И.В. Перинская, Л.Е. Куц, П.Н. Устинов****FORMATION OF POROUS Al_2O_3 POWDER COATING
BY LASER PULSE SINTERING****I.V. Rodionov, I.V. Perinskaya, L.E. Kuts, P.N. Ustinov**

Выполнены исследования способа лазерного спекания мелкодисперсного порошка Al_2O_3 в режиме импульсной генерации излучения. В качестве материала модифицируемых образцов использовалась нержавеющая хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т. Экспериментальным путем определялось влияние технологических условий лазерного спекания на термически стимулированные перестройки в порошковой присадке и формирование характеристик функционального алюмооксидного слоя. Описан вероятный механизм образования лабиринтных структур с высокой пористостью и морфологической гетерогенностью. Установлено, что суммарная пористость порошковых покрытий составляет 60-70 % при среднем размере открытых пор 180-210 мкм. Доказано, что полученные пористые структуры обладают высокой микротвердостью (10-14 ГПа), которая измерялась на поперечных микрошлифах образцов. Выявлено, что основной вклад в процесс спекания вносят энергетические параметры лазерного излучения и число сканирований поверхности (технологических проходов). Полученные порошковые покрытия на основе биосовместимой алюмооксидной керамики могут применяться на медицинских металлических имплантатах внутрикостного и чрескостного назначения.

Ключевые слова: лазерное импульсное спекание, корундовый порошок, присадочный материал, нержавеющая сталь, технологические условия лазерной обработки, структурные превращения, пористое покрытие, микротвердость

The research deals with the method of laser sintering of fine powder Al_2O_3 in the mode of pulsed radiation generation. The material used for the modified samples is stainless chromium-nickel steel 12Cr18Ni10Ti. The influence of technological conditions of laser sintering on thermally induced rearrangements in the powder additives and aluminum oxide layers characteristics is determined experimentally. A probable mechanism regarding formation of labyrinthine structures with high porosity and morphological heterogeneity is described. It has been established that the total porosity of powder coatings is 60-70 % with an average open pore size of 180-210 microns. It has been proved that the resulting porous structures have high microhardness (10-14 GPa), which was measured using transverse microsections of the samples. It has been revealed that the sintering process is mainly enhanced by the energy parameters of laser radiation and the number of surface scans (technological passes). The obtained powder coatings based on biocompatible aluminum oxide ceramics can be used in medical metal implants applied for intraosseous and transosseous purposes.

Keywords: laser pulse sintering, corundum powder, filler material, stainless steel, technological conditions of laser processing, structural transformations, porous coating, microhardness

Введение

Пористые поверхности и морфологически гетерогенные структуры находят широкое применение в производстве изделий восстановительной медицины, таких как вертлужные компоненты эндопротезов суставов, чрескостные стержневые металлофиксаторы аппаратов внешнего остеосинтеза, имплантаты внутрикостного назначения, на костные пластины. Данные медицинские изделия выполняются из конструкционных металлов и сплавов, которые обладают повышенной коррозионной устойчивостью к действию жидких биосред организма и не вызывают выраженных иммунных реакций тканей. Это титан, цирконий, тантал, алюминий и сплавы на их основе, Co-Cr и Co-Cr-Mo сплавы, нержавеющие хромоникелевые стали и т. д. Кроме того, изделия из указанных металлических материалов должны обладать повышенной пористостью поверхности для обеспечения возможности прорастания клеток костной ткани и прочного закрепления технических конструкций в костном сегменте. Для этих целей на поверхности имплантируемых изделий создают гетерогенные структуры с большим количеством открытых пор и, как правило, такие структуры формируют в виде биосовместимых покрытий из широкого спектра керамических материалов – оксиды, карбиды, нитриды металлов, фосфаты кальция и др. [1-3]. Получение высокопористых керамических покрытий возможно с применением различных по своей физической сущности технологических процессов, предусматривающих разные виды воздействия – термическое, механическое, термомеханическое, электрофизическое, химическое, электрохимическое и т. п. [4-8]. Керамические покрытия наносят чаще всего в форме мелкодисперсных порошков либо образование керамического слоя является следствием модифицирования металлической поверхности, например, способом газотермического оксидирования [9-12]. Здесь образование оксидного покрытия происходит путем его искусственного выращивания в результате реакционного взаимодействия металлов, входящих

в элементный состав основы, с кислородом воздуха с возникновением металлооксидных соединений. Протекающие фазово-структурные превращения в конечном итоге формируют слой на основе металлооксидной керамики, который по совокупности своих физико-механических свойств и функциональных характеристик сильно отличается от свойств и характеристик материала основы.

При разработке способов нанесения керамических покрытий все чаще применяют лазерную инженерию поверхности. Поверхностная лазерная обработка является локальным методом термического воздействия и может осуществляться способами лазерной закалки, цементации, отпуска, наплавки, легирования, оксидирования, спекания [13-15]. Режимы лазерной обработки предусматривают импульсно-периодическое и непрерывное воздействие генерируемого излучения, а также различные схемы сканирования поверхности, от которых зависит получаемая текстура модифицированного слоя и производительность процесса. При формировании покрытий из керамики применяются наплавка и спекание порошков, где в зависимости от термофизических и механических характеристик присадочного материала экспериментально подбираются режимы облучения лазером и определяется необходимое количество циклов сканирования поверхности (технологических проходов). Часто для химически активных порошков с повышенной реакционной способностью при лазерной наплавке и спекании применяют инертные газовые среды во избежание сильного окисления частиц на воздухе и снижения их когезии в составе покрытия. Для тугоплавких материалов задают высокую мощность излучения, и процесс обработки ведут, как правило, при непрерывной генерации лазера, но с учетом исключения образования зон пережога и выраженных дефектов структуры. Дисперсность присадочного материала также оказывает существенное влияние на подбор режимов обработки. От данного параметра в существенной степени зависят качество получаемого слоя,

его свойства и эксплуатационные характеристики. В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования возможности получения высокопористого и структурно-гетерогенного покрытия из мелкодисперсного алюмооксидного порошка способом лазерного импульсного спекания для применения в восстановительной медицине.

Методика и техника эксперимента

Для образцов, на поверхности которых производился процесс лазерного порошкового спекания, была выбрана нержавеющей хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т, широко применяемая в чрескостной имплантологии при изготовлении винтовых и спицевых конструкций аппаратов внешнего остеосинтеза.

Опытные образцы представляли пластины размерами 15×15×2 мм, которые подвергались нескольким предварительным способам обработки поверхности, включающим ультразвуковую очистку, промывку и сушку, а также создание исходного микрорельефа лазерным текстурированием.

Очистка образцов осуществлялась в ультразвуковой ванне «Кристалл-2.5». Образцы размещались в рабочем объеме ванны со спиртовым моющим раствором и обрабатывались при частоте ультразвуковых колебаний 22 кГц и интенсивности 1,2 Вт/см². Продолжительность очистки составляла 15 мин, что обеспечивало эффективное удаление с поверхности различных загрязнений, как в виде жировых фрагментов, так и в виде механических примесей (пыль, сажа, частицы твердых включений).

После ультразвуковой очистки образцы проточно промывались в дистиллированной воде и просушивались в муфельной электропечи СНОЛ 6/11 при температуре 50 °С в течение 25-30 мин для полного удаления остатков влаги с поверхности.

Далее образцы подвергались предварительной лазерной обработке в импульсном режиме сканирования для получения исходной микрогетерогенности, обеспечивающей, во-первых, необходимые условия для удержания присадочного порошкового

материала в ходе основной технологической операции – спекания, во-вторых, повышающей прочность соединения спеченного слоя порошка с поверхностью основы (рис. 1). Такая обработка проводилась на автоматизированной установке для термофизической когерентной модификации LRS-50A при частоте импульсов 20 Гц, шаге следования импульсов 0,15 мм, напряжении на лампе накачки 200 В и мощности излучения 1520 Вт. В установке используется твердотельный лазер на алюмоиттриевом гранате, активированном неодимом, с длиной волны излучения $\lambda = 1,064$ мкм.

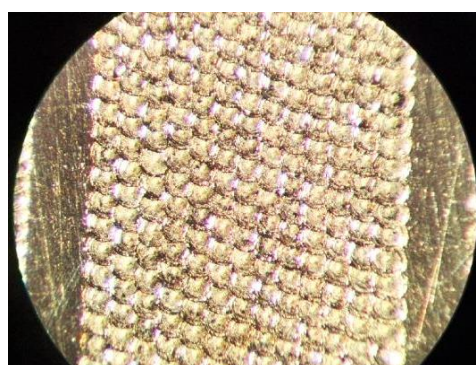


Рис. 1. Текстура образца, полученная предварительной лазерной обработкой

После проведения предварительных операций обработки осуществлялся процесс лазерного спекания. В качестве спекаемого присадочного материала использовался биосовместимый корундовый порошок Al_2O_3 дисперсностью 20-80 мкм, который равномерно тонким слоем (≈ 250 -270 мкм) наносился на поверхность исходно текстурированных стальных образцов. Спекание проводилось на приведенной выше лазерной установке LRS-50A в импульсно-периодическом режиме генерации излучения.

Режимы спекания подбирались экспериментальным путем при изменении основных параметров обработки: диаметр пятна фокусировки равнялся 0,5 мм, фокусное расстояние составляло 98 мм, напряжение на лампе накачки задавалось в интервале 250-400 В с шагом 25 В, частота импульсов устанавливалась от 10 Гц до

20 Гц, шаг импульсов менялся с 0,1 мм до 0,3 мм, длительность импульсов не изменялась и составляла 0,5 мс. Энергия единичных импульсов (Дж) и мощность излучения (Вт) устанавливались экспериментально в зависимости от задаваемого напряжения на лампе накачки установки. Для определения энергии и мощности лазерного излучения использовался прибор «Laserstar» от «OPHIR», Laser Measurement Group.

Спекание алюмооксидного порошка проводилось на участках поверхности диаметром 5 и 8 мм.

Исследование структурных изменений при спекании порошка Al_2O_3 осуществлялось методом оптической микроскопии с применением микроскопов МБС-10М и Levenhuk D50L NG, а также методом электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа «Aspex EXplorer».

Металлографический анализ проводился по стандартной методике подготовки и исследования поперечных микрошлифов образцов с определением особенностей объемной структуры (формы и размера зерен, границ раздела фаз, геометрии замкнутых и открытых пор) и толщины поверхностного слоя. При данном анализе применялась программа «Metallograph», с помощью которой исследовался гранулометрический состав и объемная структура на микроизображениях образцов с установлением размерных параметров частиц и пор.

При измерениях толщины получаемых порошковых покрытий дополнительно использовался цифровой толщиномер VOGEL.

Микротвердость покрытий определялась методом Виккерса на микротвердометре ПМТ-3М индентированием алмазной четырехгранной пирамидкой.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На первом этапе эксперимента спекание порошка Al_2O_3 проводилось при мощности импульсного излучения 160 Вт (напряжение на лампе накачки соответствовало 250 В), частоте 10 Гц, шаге сканирования

0,1 мм и энергии единичного импульса 0,08 Дж (табл.). Обработка производилась в 1 цикл сканирования, что соответствовало однократному технологическому процессу спекания. В результате в структуре покрытия не наблюдалось эффективное когезионное взаимодействие частиц, их физико-механическая взаимосвязь была слабой, покрытие проявляло склонность к хрупкому разрушению. Увеличение мощности излучения до 400 Вт при напряжении на лампе накачки 275 В и энергии импульсов 0,2 Дж, а также повышение частоты и шага следования импульсов до 20 Гц и 0,2 мм соответственно создавали более благоприятные условия для взаимодействия частиц и формирования прочной алюмооксидной матрицы. Особенно это проявлялось с увеличением количества циклов сканирования до 4 раз. В дальнейшем при проведении эксперимента задавались повышенные значения энергетических параметров импульсного излучения и анализировались характеристики микрогеометрии получаемых структур, их особенности и механизм термически стимулированной перестройки поверхности.

В результате оптико-микроскопических исследований было установлено, что при облучении частиц Al_2O_3 лазерными импульсами с энергией 0,31 Дж и мощностью 620 Вт образуются алюмооксидные матрицы с лабиринтными структурами (рис. 2). На микроизображениях отчетливо визуализируются каркас лабиринтов в виде волнообразных стенок и характерные пространства между ними. Основу каркаса составляют совокупности крупных корундовых частиц, которые не были подвержены сильному поверхностному оплавлению. Они сформировали стенки каркаса толщиной 120-150 мкм с расстоянием между ними порядка 80-110 мкм. Такая структурная ориентация частиц образовывалась при 4-х технологических проходах, при которых тепловые вложения импульсного излучения являлись достаточными для активных термохимических преобразований частиц порошка, находящихся во всем объеме присадочного слоя. Поверхность частиц приобрела

ретала высокопластичное состояние, что способствовало их эффективному контактно-му взаимодействию с последующей когезией в составе спеченного покрытия.

Характерные лабиринтные структуры формировались и при энергии импульсов 0,42 Дж, мощности 840 Вт и количестве проходов, равном 5 (см. таблицу, рис. 3).

Режимы лазерного спекания порошка Al_2O_3 , задаваемые в эксперименте

Диаметр пятна фокусировки, мм	Напряжение лампы накачки U , В	Энергия импульса, Дж	Мощность излучения, Вт	Частота импульсов, Гц	Шаг сканирования, мм
0,5	250	0,08	160	10	0,1
0,5	275	0,2	400	20	0,2
0,5	300	0,31	620	20	0,3
0,5	325	0,42	840	20	0,1
0,5	350	0,59	1180	20	0,2
0,5	375	0,76	1520	20	0,3
0,5	400	0,92	1840	20	0,3



Рис. 2. Лабиринтная структура Al_2O_3 спеченного порошка при мощности излучения 620 Вт, энергии импульсов 0,31 Дж, частоте 20 Гц и шаге сканирования 0,3 мм, полученная при 4-х проходах (диаметр пятна спекания 8 мм)



Рис. 3. Лабиринтная структура Al_2O_3 спеченного порошка при мощности излучения 840 Вт, энергии импульсов 0,42 Дж, частоте 20 Гц и шаге сканирования 0,1 мм, полученная при 5-ти проходах (диаметр пятна спекания 5 мм)

Механизм образования таких структур обусловлен двумя особенностями лазерного импульсного спекания тугоплавкого Al_2O_3 при заданных режимах обработки.

Для более крупных частиц корунда (порядка 80 мкм), имеющего температуру плавления $T_{\text{плав}} = 2044^\circ\text{C}$, реализуется механизм частичного оплавления, которое

происходит по поверхности кристаллов. Возникающая высокопластичная и термически активная оболочка обеспечивает диффузионное взаимодействие частиц и их прочную взаимосвязь в объеме спекаемого порошка. Более мелкие частицы подвержены сильному оплавлению либо полному расплавлению от тепловых вложений лазерного излучения с образованием микрорасплавов этих частиц. Образующий микрорасплав частично заполняет пространства между стенками каркаса,

сконструированного более крупными нерасплавившимися частицами, и кристаллизуется у основания матрицы. Это отчетливо визуализируется на оптических изображениях (рис. 2, 3), на которых видны участки белого цвета в углублениях лабиринтной структуры. В процессе кристаллизации расплава происходит структурная перестройка вещества с образованием множества ансамблей ультрамелкодисперсных кристаллов оксида алюминия (рис. 4).

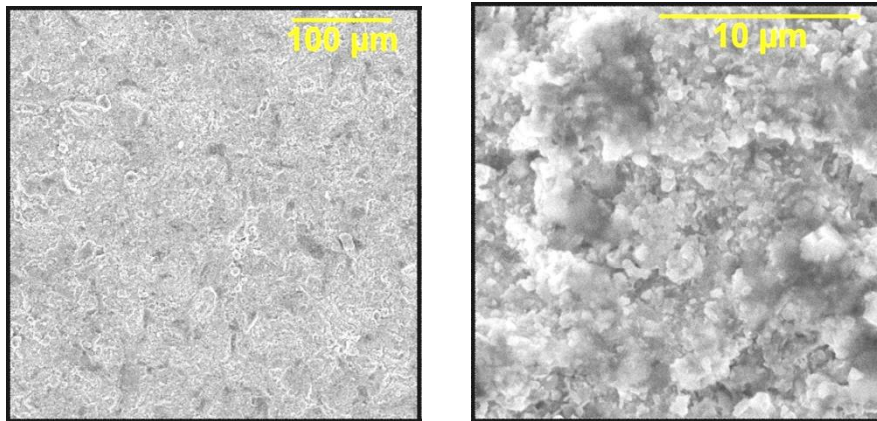


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры Al_2O_3 в углублениях лабиринтной алюмооксидной матрицы

Следует отметить, что при образовании микрорасплавов частиц происходит их интенсивное реакционное взаимодействие с кислородом воздуха и при кристаллизации возникают структуры с повышенным содержанием растворенного кислорода.

Таким образом, в ходе лазерного импульсного спекания разномодальнодисперсного порошка Al_2O_3 (размер частиц в присадке составлял от 20 мкм до 80 мкм) частично реализуется процесс лазерной наплавки, т. е. реализуется механизм, когда крупные частицы с твердыми ядрами и термически активной поверхностью формируют стенки каркаса как выступающую часть микрорельефа, а расплавленные (либо сильно оплавленные) более мелкие частицы порошка частично заполняют поры (пространства) между стенками и при затвердевании создают насыщенные кислородом мелкокристаллические структуры. Возникающие дисперсные агломерации кристал-

лов Al_2O_3 характеризуются большей структурной однородностью и равномерностью распределения частиц.

Учитывая, что присадочный материал присутствует на поверхности образцов в виде слоя толщиной $\approx 250\text{--}270$ мкм, необходимо создавать условия для термической активации частиц, находящихся в глубине слоя. Для этого требуется проведение многопроходной обработки, обеспечивающей более высокие тепловые вложения от многократного воздействия световых импульсных потоков. Тепловая энергия лазерных импульсов должна способствовать протеканию необходимого активного взаимодействия спекаемых частиц во всем объеме присадочного слоя для получения покрытия с высокими показателями физико-механических характеристик. Кроме влияния числа технологических проходов следует учитывать и энергетические параметры обработки – энергию импульсов и мощ-

ность излучения, за счет которых протекает структурная трансформация порошковой алюмооксидной присадки в процессе спекания. При проведении эксперимента в условиях, когда задавались повышенные значения энергии импульсов (от 0,59 Дж до 0,92 Дж) и мощности излучения (от 1180 Вт до 1840 Вт), формировались структуры с выраженными дефектами и зонами пережогов уже при первом цикле сканирования (см. таблицу). Повышенная энергия излучения и, как следствие, повышенный тепловой эффект, приводили к сильному оплавлению металлической основы с созданием грубых структур с выступающими на большую высоту неровностями в виде выплесков закристаллизовавшегося расплава. Покрытия получались непригодными для функционального применения

и в дальнейших исследованиях такие образцы не участвовали. Они выводились из эксперимента как результат отбраковки.

В ходе дальнейших исследований остальных образцов были изготовлены их поперечные микрошлифы для металлографического анализа объемной структуры спеченного порошка, измерения микротвердости порошкового покрытия и определения его толщины (рис. 5). Данный этап исследований позволил установить геометрию элементов лабиринтной морфологии полученных покрытий, их размерные характеристики и распределение в слое. Кроме того, это позволило определить величину микротвердости покрытий, т. к. на высокопористой и морфологически развитой поверхности процесс индентирования по Виккерсу не представляется возможным.

Оптическая визуализация микроиндентирования

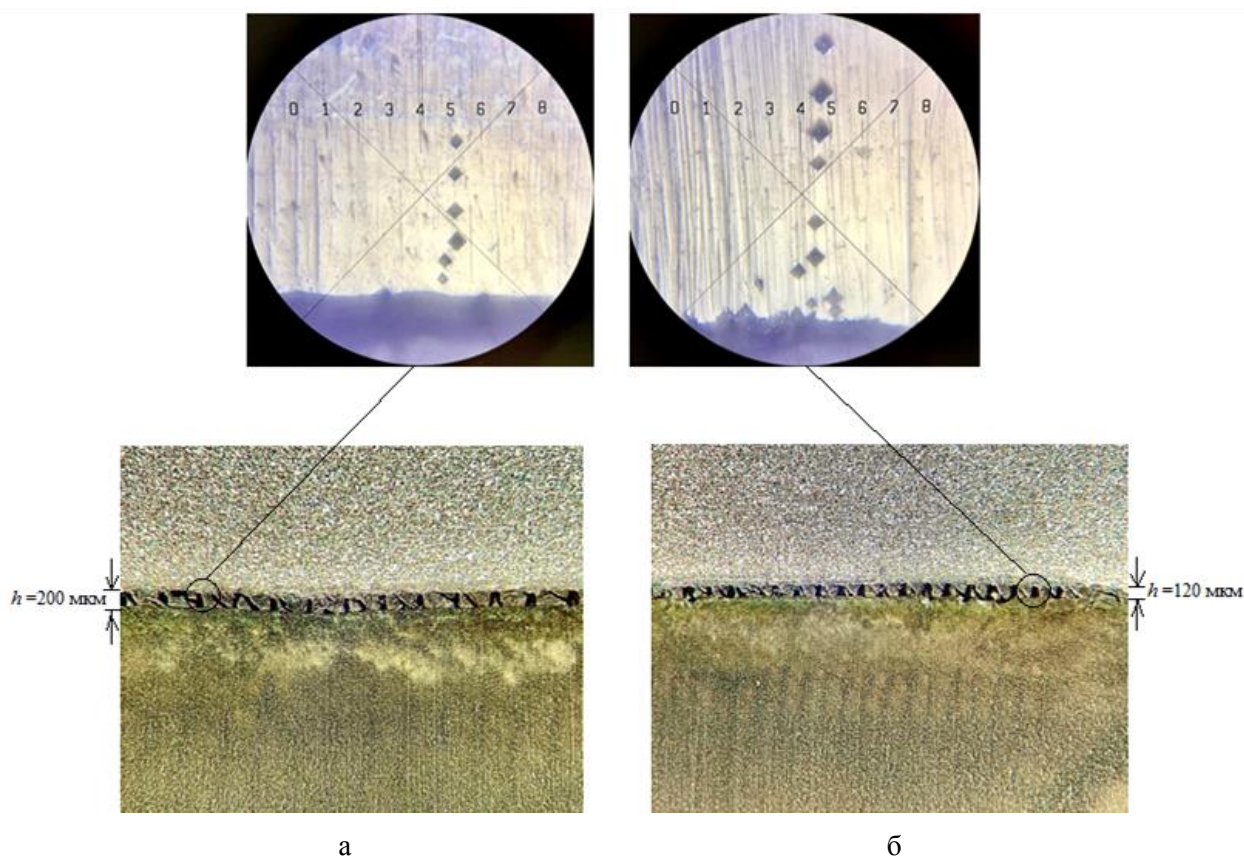


Рис. 5. Микрошлифы экспериментальных образцов с порошковым Al_2O_3 покрытием, полученным при различных режимах спекания ($\times 161$): а – при мощности излучения 620 Вт, энергии импульсов 0,31 Дж, частоте 20 Гц, шаге сканирования 0,3 мм и 4 проходах; б – при мощности излучения 840 Вт, энергии импульсов 0,42 Дж, частоте 20 Гц, шаге сканирования 0,1 мм и 5 проходах

Стенки лабиринтов в поперечном сечении имеют клиновидную форму с четким разделением пространствами, представляющими крупные открытые поры. Размер стенок и пор у покрытия, полученного при меньших энергетических параметрах спекания (рис. 5 а), заметно больше, чем у покрытия, созданного при повышенных значениях энергии и мощности излучения (рис. 5 б). Это обусловлено большим тепловым вкладом лазерного излучения в процесс структурообразования порошкового покрытия, при котором активным термическим преобразованием подвергается большее количество частиц Al_2O_3 , участвующим в формировании функционального поверхностного слоя. Частицы порошка, оплаваясь либо приобретая высокопластичную оболочку, при взаимодействии создают более плотную структуру с уменьшением размеров агломератов и снижением размера пор. Об этом свидетельствуют и результаты измерения толщины спекаемых покрытий на поперечных микрошлифах, где толщина слоя порошка, полученного при мощности излучения 620 Вт, энергии импульсов 0,31 Дж и частоте 20 Гц (рис. 5 а), практически двукратно превышала толщину слоя, полученного при мощности 840 Вт, энергии импульсов 0,42 Дж и частоте 20 Гц (рис. 5 б). Более плотная структура алюмооксидного покрытия обеспечивала и повышенные значения микротвердости, измеряемые от приповерхностного слоя стальной (12Х18Н10Т) основы до внешней границы порошкового покрытия по всей его толщине (рис. 5). Микротвердость покрытий, измеренная на микрошлифах, составляла среднестатистическое значение 10 ГПа для спеченного слоя порошка при мощности излучения 620 Вт и энергии импульсов 0,31 Дж и 14 ГПа для слоя, полученного при мощности излучения 840 Вт и энергии импульсов 0,42 Дж, тогда как микротвердость исходного (контрольного) стального образца составляла 1,87 ГПа.

С помощью программы Metallograph определена суммарная открытая пори-

стость лазерных порошковых покрытий, которая находилась в диапазоне 60-70 % при среднем размере пор 180-210 мкм. Данные параметры пористости характеризуют покрытия как высокопористые с наличием крупных открытых пор и углублений. Такие морфологически гетерогенные структуры могут применяться на поверхности внутрикостных и чрескостных имплантатов и элементов эндопротезов различных суставов, которые взаимодействуют с костной тканью при условии обеспечения остеоинтеграции. Кроме того, полученные высокопористые керамические структуры могут использоваться для заполнения медикаментозным препаратом бактерицидного либо бактериостатического действия, а также костезамещающим и остеоиндуктивным биоматериалом для повышения эффективности функционирования изделий в организме.

Заключение

Реализованный в эксперименте процесс лазерного импульсного спекания мелкодисперсного порошка Al_2O_3 и проведенные исследования выявили особенности структурных превращений в спекаемых покрытиях при различных энергетических параметрах лазерного излучения и технологических условиях электрофизической обработки. Раскрыт возможный механизм структурообразования крупнопористого алюмооксидного слоя с лабиринтной матрицей, стенки каркаса которой образованы крупными твердыми кристаллами оксида алюминия, а поверхность микроуглублений – ультрамелкодисперсными агломератами расплавившихся частиц Al_2O_3 . Установлено, что при больших тепловых вложениях импульсного излучения и многопроходном сканировании поверхности в процессе лазерного спекания частично реализуется механизм лазерной наплавки. Полученные морфологически гетерогенные структуры обладают высокой механической прочностью и микротвердостью спеченного корундового слоя на уровне 10-14

ГПа. Экспериментальные порошковые покрытия могут применяться в производстве изделий восстановительной медицины из биоинертных металлов и сплавов и,

в частности, использоваться в качестве пористых биосовместимых слоев имплантатов для повышения эффективности их приживления в костной ткани.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Osteoinduction of porous bioactive titanium metal / S. Fujibayashi, M. Neo, H.M. Kim, T. Kokubo, T. Nakamura // *Biomaterials*. 2004. Vol. 25. № 3. P. 443-450.
2. Improvement of in vitro titanium bioactivity by three different surface treatments / P.S. Vanzillotta, M.S. Sader, I.N. Bastos, G. De Almeida Soares // *Dental Materials*. 2006. Vol. 22. № 3. P. 275-282.
3. Characterization of surface oxide films on titanium and adhesion of osteoblast / B. Feng, J. Weng, B.C. Yang, S.X. Qu, X.D. Zhang // *Biomaterials*. 2003. Vol. 24. № 25. P. 4663-4670.
4. **Родионов И.В.** Анодно-оксидные биосовместимые покрытия титановых дентальных имплантатов // *Технологии живых систем*. 2006. Т. 3. № 4. С. 28-32.
5. **Родионов И.В., Серянов Ю.В.** Применение технологии анодного оксидирования при создании биосовместимых покрытий на дентальных имплантатах // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2006. № 2 (12). С. 77-87.
6. Osteoinductivity of HAp films with different surface morphologies coated by the thermal substrate method in aqueous solutions / K. Kuroda, S. Nakamoto, Y. Miyashita, R. Ichino, M. Okido // *Materials Transactions*. 2006. Vol. 47. № 5. P. 1391-1394.
7. Effects of ion concentration and pH on hydroxyapatite deposition from aqueous solution onto titanium by the thermal substrate method / K. Kuroda, R. Ichino, M. Okido, O. Takai // *Journal of Biomedical Materials Research*. 2002. Vol. 61. № 3. P. 354-359.
8. Моделирование наружного чрескостного остеосинтеза / О.В. Бейдик, К.Г. Бутовский, Н.В. Островский, В.Н. Лясников. Саратов: Изд-во СГМУ, 2002. 198 с.
9. Патент РФ на изобретение № 2332239. Способ получения биосовместимого покрытия на остеофиксаторах из титана / Родионов И.В., Бутовский К.Г., Бейдик О.В., Ткачева А.В. Опубл. 27.08.2008.
10. Поверхностно-структурные характеристики термооксидных биопокровов остеофиксаторов из стали 12Х18Н9Т / И.В. Родионов, К.Г. Бутовский, В.В. Анников, Т.С. Хапрова // *Наноструктурные функциональные покрытия и материалы для промышленности: сб. докладов 2-го Междунар. научно-технического симпозиума Харьковской нанотехнологической ассамблеи – 2007*. Т. 1. Наноструктурные материалы. Украина, Харьков, 2007. С. 139-144.
11. **Родионов И.В.** Исследование паротермических оксидных покрытий на медицинских титановых имплантатах // *Медицинская техника*. 2012. № 2 (272). С. 16-20.
12. **Родионов И.В.** Применение технологии воздушно-термического оксидирования для получения оксидных биосовместимых покрытий на чрескостных остеофиксаторах из нержавеющей стали // *Перспективные материалы*. 2012. № 4. С. 36-43.
13. **Крылова С.Е.** Влияние технологических параметров газопорошковой лазерной наплавки на структурные характеристики восстановленного поверхностного слоя коррозионностойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 10 (748). С. 35-40.
14. **Веденов А.А., Гладуш Г.Г.** Физические процессы при лазерной обработке материалов. Москва: Энергоатомиздат, 2015. 208 с.
15. Влияние карбида бора на свойства наплавленного металла на основе дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали / Е.Н. Еремин, А.С. Лосев, А.Е. Маталосова, С.А. Бородихин, И.А. Пономарев // *Омский научный вестник*. 2017. № 4 (154). С. 21-24.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Rodionov– Dr.Sci. Tech., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Перинская Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Perinskaya– Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Куц Любовь Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Lyubov E. Kuts – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Устинов Павел Николаевич – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel N. Ustinov– Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 27.02.24, принята к опубликованию 14.03.24

УВЕЛИЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛА ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Д.А. Давыдов, Д.В. Бунтаков

INCREASING THE SURFACE HARDNESS OF METAL BY ELECTROSPARK ALLOYING

D.A. Davydov, D.V. Buntakov

Одной из типовых причин выхода двигателя внутреннего сгорания (ДВС) из строя является заклинивание цилиндропоршневой группы, обусловленное межмолекулярной диффузией между поверхностями цилиндра и поршня. То есть возникает противоречивая задача. С одной стороны увеличение зазора в цилиндропоршневой группе значительно снижает КПД ДВС, с другой стороны – повышение чистоты обработки приводит к увеличению вероятности заклинивания. Проблема решается созданием регулярного рельефа. При этом, так как, работа группы проходит под воздействием высоких температур при постоянном механическом трении, что требует повышенной поверхностной твёрдости.

Ключевые слова: *поверхностная твердость металла, метод обработки, электроискровое легирование, поршень двигателя внутреннего сгорания*

При производстве поршней применяют различные методы обработки, целью которых является повышение поверхностной твердости, износостойкости и надежности. В настоящее время самым распространенным таким методом является закалка.

Однако, как показывает опыт эксплуатации, закалка не позволяет получить достаточно высоких эксплуатационных свойств. С этой целью при производстве поршней применяют различные дополнительные операции, повышающие поверх-

One of the main causes of failures in internal combustion engines (ICE) is cylinder-piston group jamming caused by intermolecular diffusion between the cylinder and piston surfaces. This often leads to a set of challenges. On the one hand, increasing the clearance in the cylinder-piston group significantly reduces efficiency of the internal combustion engine; on the other hand, increasing the cleanliness of processing leads to an increase in the probability of jamming. The problem can be solved by creating a regular relief. Since the operation of the group takes place under the influence of high temperatures with constant mechanical friction, increased surface hardness is required.

Keywords: *surface hardness of metal, processing method, electrospark alloying, internal combustion engine piston*

ностную твердость, износостойкость и формирующие регулярный рельеф. К ним относятся:

- хонингование;
- дробеструйная обработка;
- обкатка твёрдосплавным шариком.

Под хонингованием понимается технология абразивной обработки конических и цилиндрических деталей с помощью особых насадок – хонов, обеспечивающая необходимую степень шероховатости поверхностей и точность их геометрических параметров.

Как частный случай хонингования можно рассматривать и дробеструйную обработку [1].

При таком способе обработки применяются специальные дробеструйные установки. Принципиальная схема такой установки приведена на рис. 1. Заготовка помещается в рабочую камеру, где на

ее поверхность из сопла под воздействием сжатого воздуха подается стальная дробь.

Из-за воздействия воздуха дробь развивает высокую скорость и при столкновении с поверхностью заготовки деформирует ее. Это приводит к пластической деформации и ее уплотнению, вследствие чего происходит повышение поверхностной твердости.

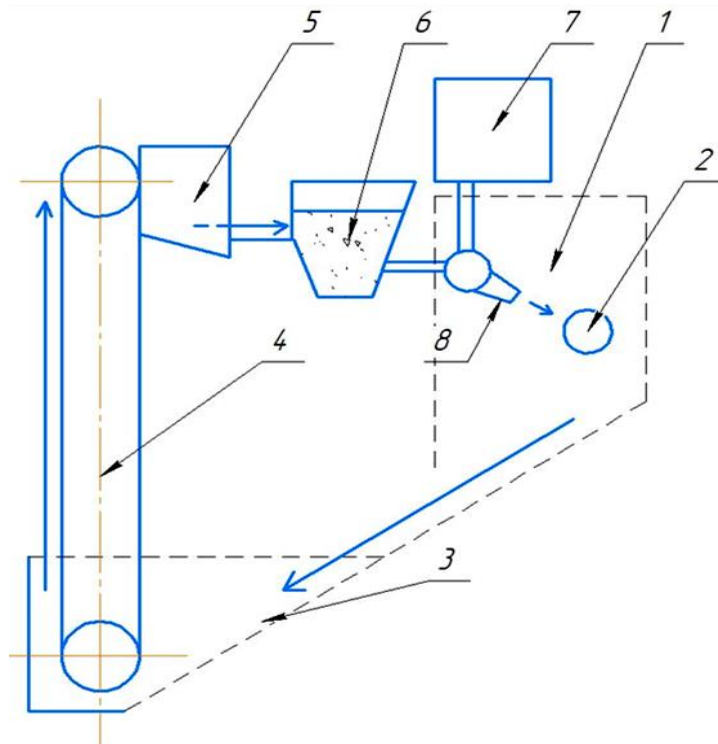


Рис. 1. Принципиальная схема пневматической дробеструйной установки:
1 – рабочая камера; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – приемный бункер; 4 – элеватор;
5 – сепаратор; 6 – загрузочный бункер; 7 – воздушный компрессор; 8 – сопло

В то же время при применении такого метода обработки происходит эрозионный съем металла с поверхности, а это неизбежно приводит к изменению геометрической формы и размера поршня. Такой метод требует сложной и точной настройки оборудования. Это приводит к усложнению и удорожанию производства.

Этого недостатка лишён метод упрочнения поверхности путем обкатки стальным шариком [2].

Метод заключается в следующем: заготовка зажимается в патроне токарного станка или другом специальном станке. Обкатное приспособление, принципиаль-

ная схема которого изображена на рис. 2, закрепляется в резцедержателе и приводится в соприкосновение с поверхностью обрабатываемой заготовки. Заготовка приводится во вращательное движение.

Благодаря давлению, создаваемому шариком на поверхности заготовки, происходит ее пластическая деформация, в результате чего происходят уплотнение верхнего поверхностного слоя, заполнение микролунок, пор, сглаживание поверхности и устранение задиров.

Такой способ обработки позволяет повысить не только твердость поверхности, но и ее чистоту. Прочность деталей возрастает на 30-60 %.

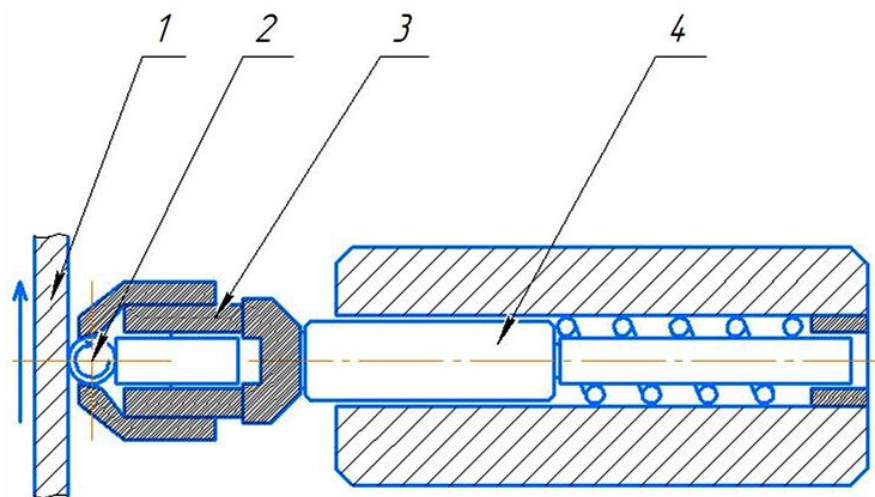


Рис. 2. Одношариковая накатка с опорой шарика на один подшипник:
1 – обрабатываемая поверхность; 2 – упрочняющий шарик; 3 – держатель; 4 – упор

Однако наряду с преимуществам, такой способ имеет и недостатки. Такой метод обработки не позволяет достичь желаемого результата. Это происходит вследствие неточностей формы поверхности, подвергающейся обработке, погрешностей, возникающих при установке заготовки в станке, из-за возникающих деформаций изгиба заготовки под давлением обрабатывающего инструмента, а также наличия примесных включений в основном металле и других механических свойств.

Перспективной технологией, позволяющей нивелировать недостатки существующих методов обработки, служит метод электроискрового легирования металлов.

Процесс обработки заключается в нанесении на поверхность заготовки покрытия электроискровым методом [3]. Принципиальная схема установки для электроискрового легирования представлена на рис. 3.

Суть метода состоит в следующем: заготовка закрепляется в токарном или специальном станке. Электрод приводится в соприкосновение с поверхностью заготовки, а заготовка приводится во вращательное движение. По мере вращения заготовки происходит множество импульсных искровых разрядов между ее поверхностью и электродом. В процессе таких разрядов происходит локальный нагрев пятна контакта и перенос металла электрода на обрабатываемую поверхность.

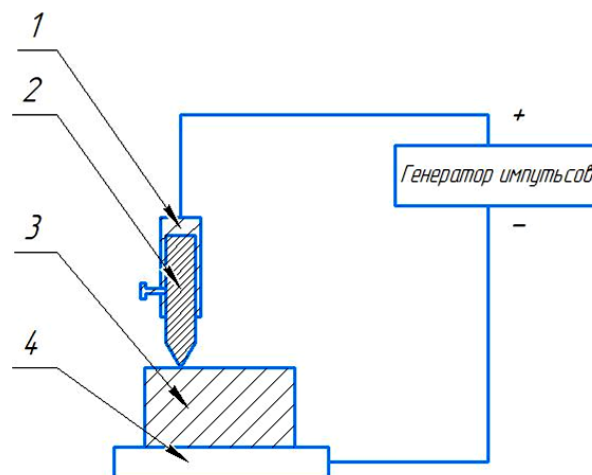


Рис. 3. Принципиальная схему установки для электроискрового легирования:
1 – вибратор-держатель для электрода;
2 – электрод (анод); 3 – обрабатываемая поверхность (катод); 4 – контактная пластина

Для определения влияния процесса электроискрового легирования поверхностей на их твердость был проведен ряд экспериментов.

В качестве исследуемых материалов выступили сталь и алюминий. Металлические образцы были подвержены электроискровому легированию с использованием медного электрода. Перед обработкой образцов были проведены измерения их твердости по методу Виккерса, результаты приведены в таблице.

Для обработки был выбран мягкий режим, так как именно такой режим обеспе-

чивает наименьшую шероховатость и большую чистоту поверхности. Обработка образцов производилась при значении тока $I = 0,01$ А, напряжении $U = 36$ В и емкости

разрядного конденсатора $C = 200$ мкФ. После обработки образцов измерения их твердости были проведены повторно, результат представлен в таблице.

Результаты измерения твердости образцов

Материал образца	Необработанная поверхность	Обработанная поверхность
	Нагрузка на индентор: 5 МПа	
Сталь	73	210
Алюминий	139	172

Примечание: коэффициент вариации по твердости составляет 3-5 %.

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод, что электроискровое легирование дает значительное увеличение твердости поверхности обрабатываемого металла.

При электроискровом легировании с использованием медного электрода твердость алюминиевой поверхности возросла на 24 %, а стали – на 188 %.

Полученные данные доказывают, что при электроискровом легировании твердость металлов возрастает – это позволяет получить твердую поверхность, при этом сохраняя пластичность в сердцевине металла. Это свойство особенно важно для деталей машин, которые испытывают в процессе эксплуатации частые знакопеременные нагрузки – например, зубчатые колеса или элементы двигателей внутреннего сгорания.

Как отмечалось ранее, задача состоит в повышении эксплуатационного ресурса поршней двигателя внутреннего сгорания.

Поставленную задачу возможно решить путем увеличения поверхностной твердости поршня при помощи технологии электроискрового легирования поверхностей, подверженных наибольшему износу, – канавок и юбки. На рис. 4 а представлен поршень двигателя внутреннего сгорания, на юбке 2 которого нанесено покрытие 1 методом электроискрового легирования с использованием медного электрода. Покрытие нанесено в виде чередующихся участков. На рис. 4 б представлен разрез поршня ДВС, где видно, что на участки поршневых канавок 1 также нанесено электроискровое покрытие 2, препятствующее износу поршня, в виде сплошных полос по внешнему и внутреннему радиусу нижней стенки поршневой канавки.

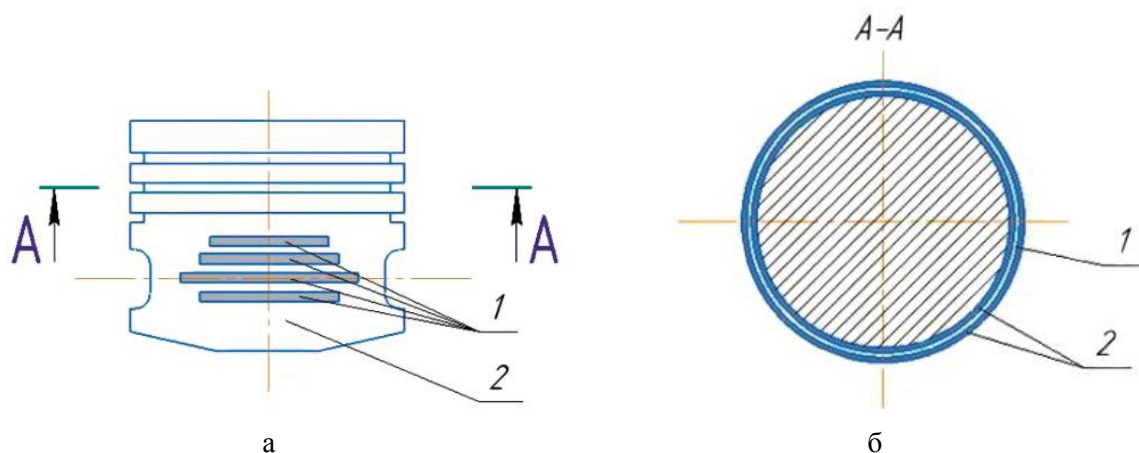


Рис. 4. Поршень двигателя внутреннего сгорания, подверженный электроискровому легированию: а – вид сбоку; б – разрез – вид сверху

Выводы

В процессе такой обработки происходит структурное превращение поверхностных слоев за счет термосилового воздействия искрового разряда на поверхность и переноса материала электрода на нее. В результате увеличивается твердость наружного слоя,

повышается его чистота, а рельеф наружной поверхности получается более регулярным.

При этом на поверхности поршня напыляется слой меди, который обуславливает снижение сухого трения между поршнем и цилиндром двигателя, снижая износ цилиндропоршневой группы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2439211 С1 Российская Федерация, МПК С25D 11/08, С25D 11/26, F02F 3/12. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия, титана и их сплавов: № 2010140537/02: заявл. 04.10.2010: опубл. 10.01.2012 / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов [и др.].

2. Упрочнение поверхностного слоя деталей машин / А.А. Дудников, А.И. Беловод, А.В. Канивец, В.В. Дудник // Технологический аудит и резервы производства. 2011. Т. 1. № 1 (1). С. 30-33.

3. Кудряшов А.Е. Анализ современных методов обработки поверхности и электроискровой обработки // Нанотехнологии: наука и производство. 2017. № 4. С. 67-75.

Давыдов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бунтаков Данил Владиславович – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry A. Davydov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Danil V. Buntakov – Postgraduate student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.02.24, принята к опубликованию 14.03.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЗОНАТОРА СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ

Д.В. Максудов

MATHEMATICAL MODELING OF A HONEYCOMB OZONE GENERATOR

D.V. Maksudov

Представлена конструкция озонатора сотовой структуры. Разработана математическая модель протекающих в нем физических процессов и на ее основе построена имитационная модель в ПК Scilab учитывающая взаимное влияние таких параметров как температура, концентрация озона и мощность барьерного разряда. Представлены результаты численных экспериментов, проведенных используя указанную имитационную модель. Для верификации этих результатов проведены натурные экспериментальные исследования зависимости концентрации озона от времени для упомянутой конструкции озонатора.

Ключевые слова: озонатор, газоразрядные процессы, численные методы, ПК Scilab

The paper presents the structure of a honeycomb ozone generator. A mathematical model of the physical processes occurring within the construction has been developed. It has been used as the basis for a simulation model built in Scilab PC which takes into account the interdependence of such parameters as temperature, ozone concentration and barrier discharge power. The results of numerical experiments based on the specified simulation model are presented. To verify these results, full-scale experimental studies relating dependence of ozone concentration on the timing parameters are carried out for the proposed design of ozone generator.

Keywords: ozonizer, gas-discharge processes, numerical methods, Scilab software package

Введение

Озон, представляющий собой трехатомную модификацию кислорода, обладает высокими окислительными способностями, что делает привлекательным его использование в медицине, санитарии, в ракетных технологиях, а также в различных отраслях промышленности (пищевая, целлюлозно-бумажная, нефтяная, химическая и т. д.).

В то же время высокая стоимость и энергоемкость производства озона сдерживают распространение технологий, связанных с его применением. Решение этой проблемы является одним из актуальных вопросов современной науки.

Экспериментальные исследования показывают, что образование озона зависит от множества факторов, оказывающих взаимное влияние друг на друга: от температуры, давления, состава газа и скорости его потока [1-5], формы электродов и диэлектрического барьера [6, 7], плотности мощности барьерного разряда [1, 2], амплитуды [8] питающего напряжения.

Как отмечается в работе [9], для оптимизации конструкции озонатора и процесса получения озона требуется разработка отсутствующей в настоящее время математической модели, которая могла бы учесть большое количество взаимозависимых па-

раметров, оказывающих влияние на эффективность образования озона.

1. Конструкция озонатора сотовой структуры

На рис. 1 представлена конструкция озонатора сотовой структуры, разрабо-

танного на кафедре электромеханики Уфимского университета науки и технологий, для которого проводилось математическое моделирование, а также численные и натурные экспериментальные исследования.

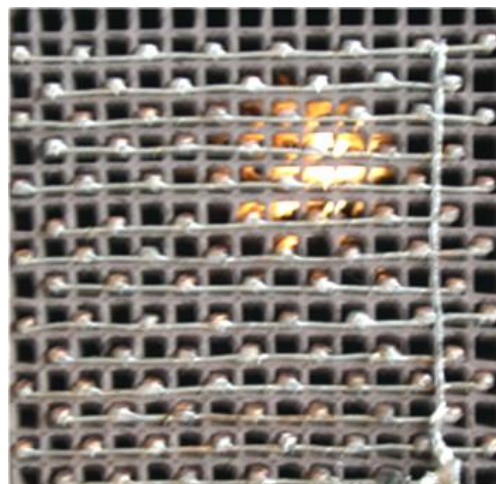
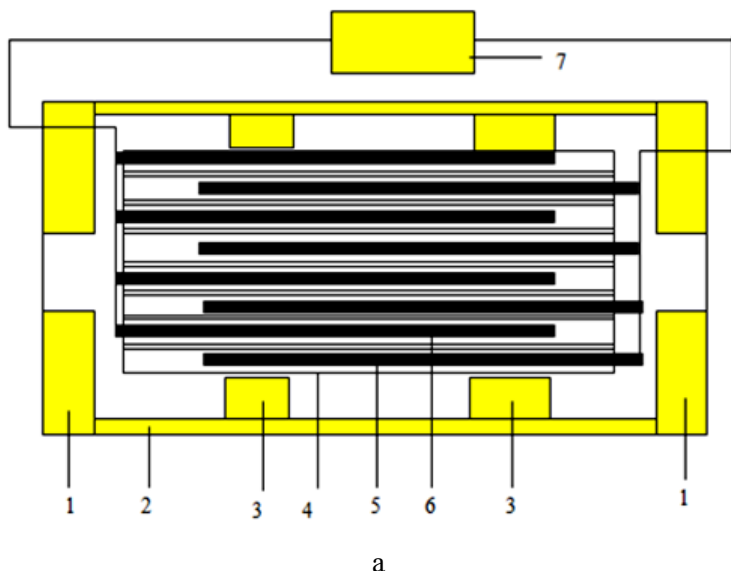
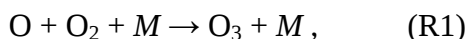


Рис. 1. а – озонатор сотовой структуры в продольном разрезе:
1 – фланцы; 2 – диэлектрический корпус; 3 – изолирующие стойки;
4 – диэлектрик-катализатор сотовой структуры;
5, 6 – электроды; 7 – источник переменного тока;
б – фотография торца озонатора сотовой структуры

В данной конструкции озонатора две группы электродов 5 и 6, подключенные к высоковольтному источнику питания 7, в шахматном порядке вложены в каналы (соты) диэлектрического блока сотовой структуры 4.

2. Математическое моделирование физических процессов, протекающих в озонаторе

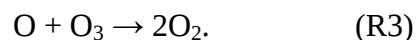
Образование озона внутри озонатора происходит в основном в результате реакции



в которой участвует атомарный кислород, образующийся в барьерном разряде при диссоциации молекулярного кислорода электронным ударом



Параллельно с реакциями образования озона происходят также антагонистические реакции его разложения, основной из которых является реакция



Энергия активации, необходимая для реакций (R1) и (R3), составляют соответственно $E_{1a} = 2,77$ кДж/моль; $E_{3a} = 9,66$ кДж/моль. Энергия электрона, необходимая для реакции (R2) должна быть не менее 12,5 эВ.

Кинетическое уравнение образования озона с учетом реакций (R1)-(R3) имеет вид

$$\frac{d[\text{O}_3]}{dt} = K_1[\text{O}_2][\text{O}] - K_3[\text{O}_3][\text{O}], \quad (1)$$

где $[\text{O}]$, $[\text{O}_3]$, $[\text{O}_2]$ – соответственно, концентрация атомарного кислорода, озона

и двухатомного молекулярного кислорода; K_1 , K_3 – соответственно константы скорости реакций (R1) и (R3), экспоненциально зависящие от температуры T

$$K_1 = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right); \quad (2)$$

$$K_3 = A_3 \exp\left(\frac{-E_{3a}}{RT}\right), \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль×К); A_1 , A_3 – соответственно факторы частоты реакций (R1) и (R3).

Концентрация атомарного кислорода пропорциональна концентрации свободных электронов, которая, в свою очередь, пропорциональна удельной мощности барьерного разряда

$$[O] = K_0 \frac{P}{V}, \quad (4)$$

где P – активная мощность барьерного разряда, Вт; V – суммарный объем каналов каталитического блока, м³.

С учетом (2)-(4) уравнение (1) может быть переписано в виде

$$\frac{d[O_3]}{dt} = K'_1([O_2]_0 - [O_3]) - K'_3[O_3], \quad (5)$$

где

$$K'_1 = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V}; \quad (6)$$

$$K'_3 = A_3 \exp\left(\frac{-E_{3a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V}; \quad (7)$$

$[O_2]_0$ – начальная концентрация кислорода.

Поскольку $E_{3a} > E_{1a}$, с ростом температуры концентрация озона, определяемая балансом реакций (R1) и (R3), будет уменьшаться.

Изменение температуры диэлектрического блока определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P - \Delta T \alpha S}{mC}, \quad (8)$$

где $\Delta T = T - T_0$ – относительная температура, т. е. разность между температурой каталитического блока T (распределение температуры внутри каталитического блока принимается равномерным по его объему) и температурой окружающей среды T_0 , К; t – время, с; S – площадь поверхности каталитического блока, м²; α – коэффициент теплообмена между поверхностью каталитического блока и окружающим воздухом, Вт/(м²×К); m – масса каталитического блока, кг; C – теплоёмкость катализатора, Дж/(кг×К).

Мощность барьерного разряда зависит от емкости разрядного промежутка ячейки C_v , напряжения электрического пробоя в сотовой ячейке озонатора и от других параметров:

$$P = 2f \frac{u_v - u_g}{u_{pr} - u_g} N C_v (u_{pr}^2 - u_g^2), \quad (9)$$

где f – частота, Гц; N – число ячеек каталитического блока озонатора; u_g – напряжение гашения барьерного разряда, В; u_v – напряжение между электродом и диэлектрическим барьером ячейки озонатора, В; u_{pr} – напряжение пробоя, В.

Напряжение пробоя, в свою очередь, зависит от температуры газовой смеси и ее химического состава:

$$u_{pr} = \frac{B p \delta}{\ln \left(\frac{A p \delta}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right)}, \quad (10)$$

где p – давление газа в ячейке, Па; γ – коэффициент вторичной электронной эмиссии; A – константа, определяемая составом газа; B – константа, определяемая энергией ионизации газа,

$$A = \frac{\pi \left(\sum_{i=1}^n r_i p_i \right)^2}{kT}; \quad (11)$$

$$B = A \times \sum_{i=1}^n E_{\text{и}i} p_i, \quad (12)$$

где r – радиус молекулы i -го химического соединения в газах, проходящих через озонатор; k – постоянная Больцмана; $E_{\text{и}i}$ – энергия ионизации молекулы i -го химического соединения; p_i – мольная доля i -го химического соединения в газе.

3. Результаты численного имитационного моделирования в программном пакете Scilab

Структура имитационной модели в программном пакете Scilab для решения

системы уравнений (5)-(12) показана на рис. 2. В данном случае моделируется образование озона в чистом кислороде. Изменение концентрации озона рассчитываются путем численного решения дифференциального уравнения (5) методом конечных разностей в ПК Scilab с учетом (6)-(7), изменение температуры – решением (8) с учетом (9)-(12). Значения параметров, использованные в данной имитационной модели, приведены в табл. 1.

В данной модели имеются три блока-осциллографа (см. рис. 2), которые показывают зависимости от времени для температуры (осциллограф 1), концентрации озона (осциллограф 2) и мощности барьерного разряда (осциллограф 3).

Графики, полученные с этих осциллографов, показаны на рис. 3-5.

Таблица 1 – Параметры имитационной модели

Параметр	Значение
Масса диэлектрического блока m , кг	3
Теплоемкость диэлектрика C , Дж/(кг×К)	700
Объем диэлектрического блока V , м ³	0,000735
Площадь поверхности S , м ²	0,05
Коэффициент теплообмена α , Вт/(м ² ×К)	50
Температура окружающей среды T_0 , К;	300
Число каналов N	225
Напряжение U_v , кВ	10
Частота f , Гц	200
Емкости разрядного промежутка C_v , Ф	10^{-11}
Энергия активации для (R1) E_{1a} , Дж/моль	2772
Энергия активации для (R3) E_{3a} , Дж/моль	9660
Диаметр молекулы O_2 , нм	0,346
Диаметр молекулы O_3 , нм	0,58
Энергия ионизации для O_2 и O_3 , эВ	13.61

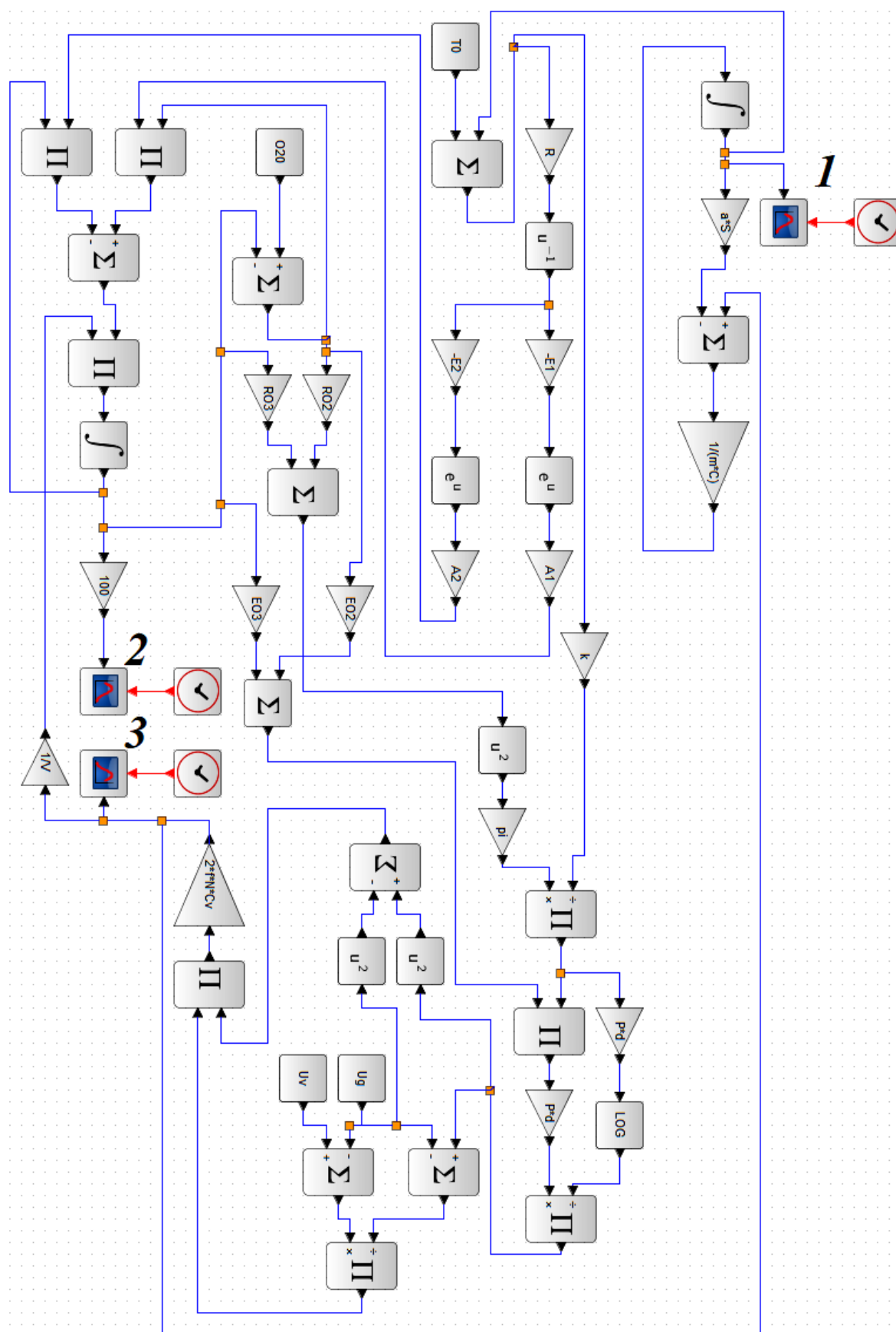


Рис. 2. Структура имитационной модели в программном пакете Scilab для решения системы уравнений (5)-(12)

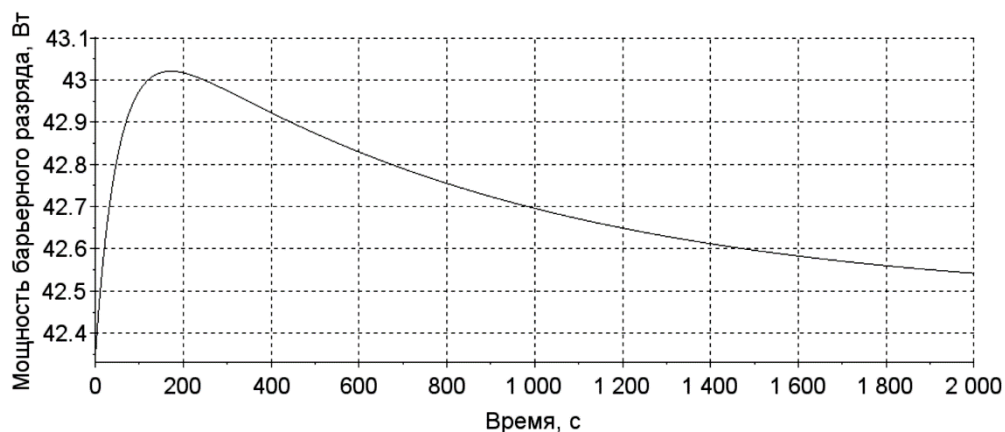


Рис. 3. Зависимость мощности барьерного разряда от времени

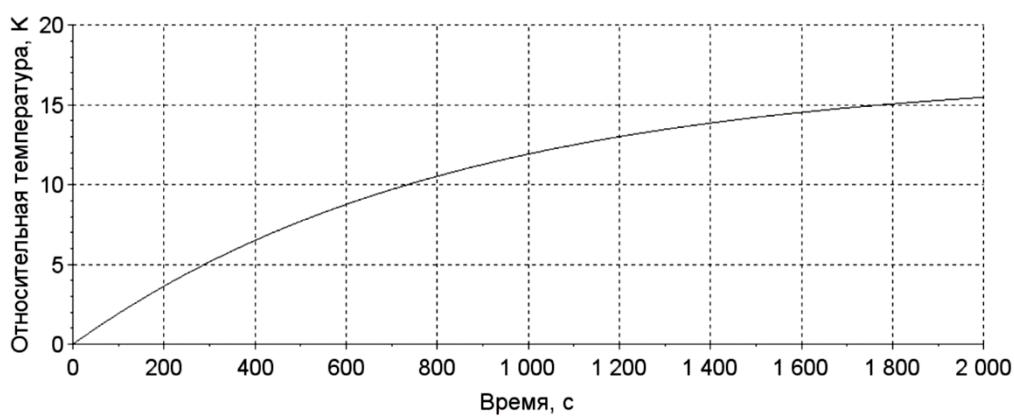


Рис. 4. Зависимость температуры от времени
(за ноль принято значение температуры в момент включения озонатора)

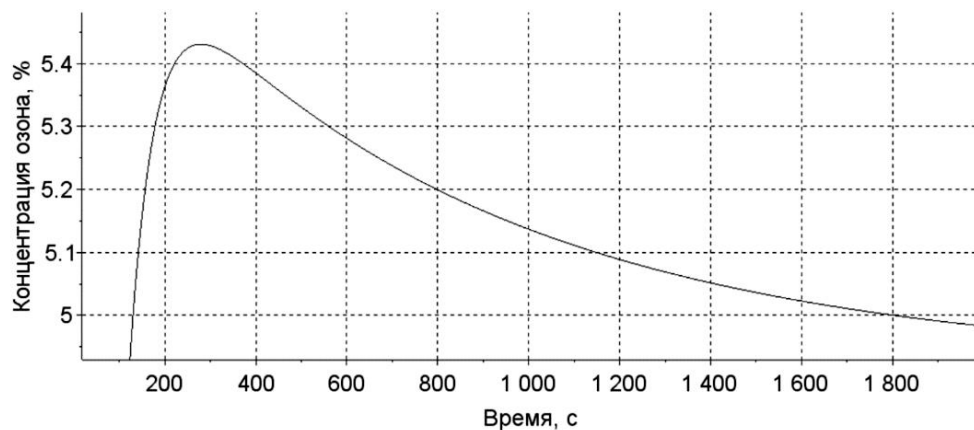


Рис. 5. Зависимость концентрации озона от времени

4. Сравнение результатов численных и натуральных экспериментов

Как показывают результаты численного моделирования, приведенные на рис. 5, концентрация озона после достижения пикового значения в первые минуты работы озонатора испытывает затем некоторое снижение. Для верификации данных ре-

зультатов были проведены натурные экспериментальные исследования, используя озонатор сотовой структуры, параметры которого равны параметрам, при которых производились вышеуказанные численные эксперименты. В качестве диэлектрика-катализатора использовался оксид алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

В приборную базу экспериментальных работ включено следующее оборудование: звуковой генератор ЗГ-10, поточный анализатор озона «Циклон 5-2», позволяющий определять концентрацию озона в газозо-воздушном потоке на выходе озонатора

в диапазоне $0..50 \text{ г/м}^3$, наносекундный осциллограф С1-97, поточный анализатор оксидов азота ECOM-SG, прибор А-565 с термопарой, самописец КСП-4. Схема экспериментальной установки показана на рис. 6.

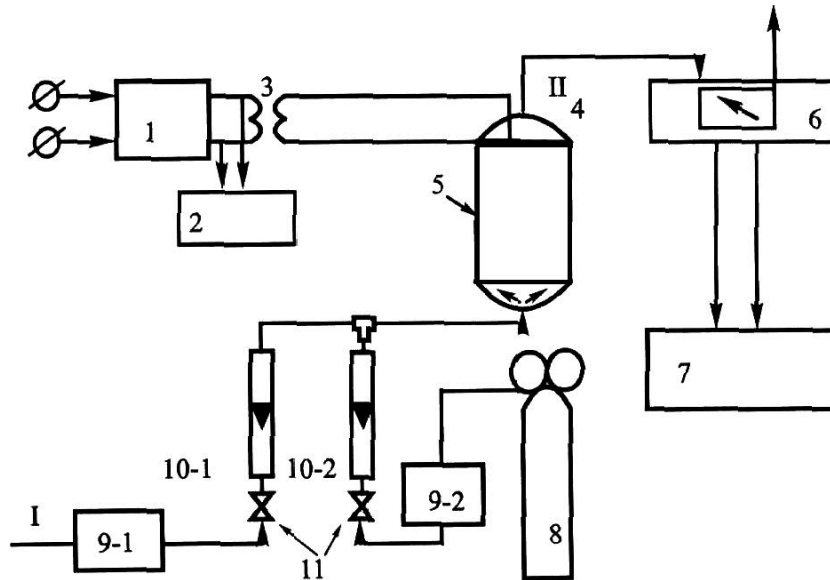


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 – мультивибратор; 2 – наносекундный осциллограф; 3 – катушка ВР-114; 4 – пластиковый реактор; 5 – озонатор; 6 – газоанализатор; 7 – самописец; 8 – баллон с кислородом; 9-1, 9-2 – установки осушения газа; 10-1, 10-2 – датчики расхода газа; 11 – регуляторы расхода газа

На рис. 7 показано сравнение кривых зависимости концентрации озона от времени после прохождения пикового значения, полученных в результате численных

и натурных экспериментов для случая образования озона в чистом кислороде. Концентрация озона для обеих кривых выражена в процентах от пикового значения.

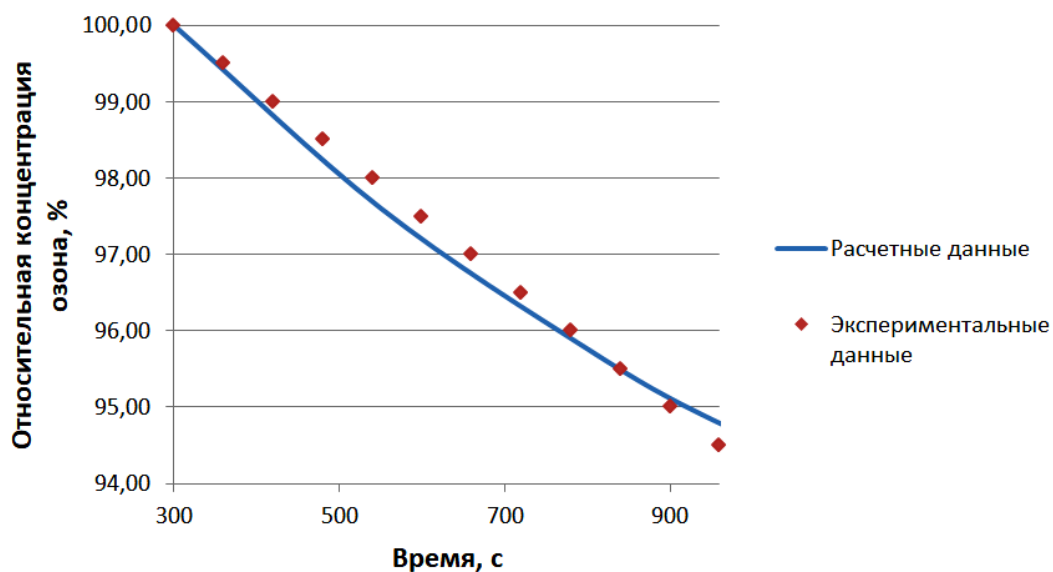


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных (пунктирная кривая) и результатов вычисления (сплошная кривая) концентрации озона относительно пикового значения

Заключение

Представлена конструкция озонатора сотовой структуры. Разработана математическая модель протекающих в нем физических процессов и на ее основе построена имитационная модель в ПК Scilab, учитывающая взаимное влияние таких параметров как температура, концентрация озона и мощность барьерного разряда. Представлены результаты численных экспериментов, проведенных используя указанную имитационную модель. Для верификации этих

результатов проведены натурные экспериментальные исследования зависимости концентрации озона от времени для упомянутой конструкции озонатора.

Установлено, что после прохождения пикового значения в первые минуты работы озонатора концентрация озона затем испытывает некоторое снижение.

Разработанная имитационная модель может быть использована для оптимизации конструкции озонатора и характеристик его питания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Slawomir Jodzis, Marcel Zięba.** Energy efficiency of an ozone generation process in oxygen // Analysis of a pulsed DBD system. Vacuum. Vol. 155, September 2018. P. 29-37.

2. **Slawomir Jodzis, Wojciech Patkowski.** Macrokinetic study on ozone boundary concentration // Effect of temperature. Journal of Electrostatics. Vol. 85, February 2017. P. 43-51.

3. Characteristics of temperature distribution in atmospheric pulsed surface dielectric barrier discharge for ozone production / Dingkun Yuan, Guangxue Zhang, Zhongqian Ling, Angjian Wu, Yong He, Zhihua Wang // Vacuum. Vol. 176, June 2020.

4. Effect of Oxygen Pressure and Flow Rate on Electrical Characteristic and Ozone Concentration of a Cylinder-Cylinder DBD Ozone Generator / S. Boonduang, S. Limsuwan, W. Kongsrir, P. Limsuwan // Procedia Engineering. 2012. Vol. 32. P. 936-942.

5. **Slawomir Jodzis, Klaudia Baran.** The influence of gas temperature on ozone generation and decomposition in ozone generator. How is ozone decomposed? // Vacuum. Available online 4 October 2021.

6. Effective ozone generation utilizing a meshed-plate electrode in a dielectric-barrier discharge type ozone generator / Seung-Lok Park, Jae-Duk Moon, Seug-Hoon Lee, Soo-Yeon Shin // Journal of Electrostatics. May 2006. Vol. 64. Iss. 5. P. 275-282.

7. **Jodpimai S., Boonduang S., Limsuwan P.** Dielectric barrier discharge ozone generator using aluminum granules electrodes // Journal of Electrostatics. April 2015. Vol. 74. P. 108-114.

8. Experimental study on discharge characteristics and ozone generation of dielectric barrier discharge in a cylinder-cylinder reactor and a wire-cylinder reactor / Zhi Fang, Yuchang Qiu, Yanzhou Sun, Hui Wang, Kuffel Edmund // Journal of Electrostatics. July 2008. Vol. 66. Iss. 7-8. P. 421-426.

9. Optimization on cleaner intensification of ozone production using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Parametric and comparative study / Ainy Hafeez, Syed Ali Ammar Taqvi, Tahir Fazal, Fahed Javed, Zakir Khan, Umme Salma Amjad, Awais Bokhari, Nasir Shehzad, Naim Rashid, Saifur Rehman, Fahad Rehman // Journal of Cleaner Production. Vol. 252, 10 April 2020.

Максудов Денис Вилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского университета науки и технологий

Denis V. Maksudov – PhD (Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology

Статья поступила в редакцию 29.01.24, принята к опубликованию 14.03.24

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3.095.3-042.3: [621.3.011.2:662.987]

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА УДЕЛЬНУЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Е.Г. Зиновьева, Г.А. Кравченко, А.Г. Калинин,
Д.Г. Михадаров, Д.А. Ефремов

EFFECT OF THE ELECTRIC FIELD STRENGTH ON SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF COOLANTS

E.G. Zinovjeva, G.A. Kravchenko, A.G. Kalinin,
D.G. Mikhadarov, D.A. Efremov

В работе рассмотрено влияние эффекта ионизации, вызванного наличием напряженности электрического поля, на удельную электропроводность жидких теплоносителей. Показано, что высокотемпературные теплоносители не меняют значения удельной электропроводности после испытания, сохраняя свой первоначальный состав, что свидетельствует об устойчивости к воздействию электрического поля. Наоборот, удельная электропроводность низкотемпературных водорастворимых теплоносителей под воздействием электрического поля изменяется в пределах от 4 до 26 %. Устойчивость высокотемпературных теплоносителей к воздействию напряженности электрического поля обеспечивает меньшую склонность к разложению и пенообразованию, а также снижает риск появления процесса коррозии в радиаторе.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, удельная электропроводность, силовые полупроводниковые модули, теплоноситель, тонкослойная хроматография

The paper considers the influence of the ionization effect caused by the electric field strength on specific electrical conductivity of liquid coolants. It is shown that high-temperature coolants do not change the value of specific conductivity after the testing procedure, retaining their original composition, which indicates resistance to the electric field. Alternately, specific electrical conductivity of low-temperature water-soluble coolants under the influence of electric field changes ranges within 4 and 26 %. Resistance of high-temperature coolants to the electric field strength improves the decomposition and foaming capacity, as well as reduces the risk of the radiator corrosion.

Keywords: electric field strength, specific conductivity, power semiconductor modules, coolant, thin layer chromatography

Введение

Жидкостные системы охлаждения перспективны для снижения разрушающих воздействий, вызываемых тепловыми явлениями в силовых полупроводниковых модулях благодаря высокой эффективности.

На базе ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» разработана конструкция гибридного медь-алюминиевого жидкостного охладителя, полученного по технологии сварки трением с перемешиванием [1-3].

При создании жидкостных охладительных систем одним из основных вопросов является совместимость теплоносителя с материалами охладителя [4-11]. В процессе эксплуатации на свойства теплоносителя влияют различные факторы, такие как температура, воздействие электрического поля, контакт с материалом охладителя. Под воздействием этих факторов химический состав теплоносителя может изменяться, что ведет к изменению физико-химических параметров, например, вязкости, возможности возникновения коррозии, что в свою очередь может привести к выходу из строя системы охлаждения, а затем и всего силового блока в целом.

Результаты исследования физико-химических и теплофизических свойств некоторых теплоносителей, применяемых охлаждающих системах приведены в работах [12, 13].

Практическое применение биметаллического охладителя – охлаждения силовых полупроводниковых модулей в установках со средним напряжением 6-15 кВ, где компоновочное решение изделия выигрывает в габарите и ряде эксплуатационных свойств.

Жидкий теплоноситель принудительно циркулирует по замкнутому контуру внутри одного или группы охладителей. На внешнюю поверхность каждого охладителя смонтированы один или несколько полупроводниковых модулей с электрически изолированной теплоотводящей подложкой у каждого модуля. Группа полупроводниковых модулей в зависимости от топологии и схемы включения работает в условиях сетевого напряжения 6 или 10 кВ перемен-

ного тока и 9 или 15 кВ постоянного тока соответственно, где прямо или косвенно присутствует эффект ионизации среды, вызванный наличием высокой напряженности электрического поля.

Изменение химического состава теплоносителя можно обнаружить по изменению удельной электропроводности χ . В ряде работ [12-14] показано, что величина удельной электропроводности охлаждающих жидкостей до и после эксплуатации различна, что свидетельствует о деградации теплоносителей и протекании при их контакте с металлами коррозионных процессов. Также изменяются водородный показатель, плотность и вязкость водно-органических теплоносителей в процессе эксплуатации.

Целью работы является оценка свойств жидких теплоносителей в условиях воздействия высокой напряженности электрического поля для подтверждения их эксплуатационной пригодности в охлаждающих системах силовых полупроводниковых модулей.

1. Экспериментальная часть

Объектами исследования выбраны образцы жидких теплоносителей средней вязкости серии Термолан (производитель АО «АльфаХимПром», г. Москва): Silica SL, ECO-65, D50, K-55, F-65, SH, A1, LAB-7, LT, M и N.

Основным элементом испытательного стенда является аппарат АИИ-70, предназначенный для проведения испытаний повышенным напряжением переменного и выпрямленного тока. Электрическая схема стенда показана на рис. 1.

Стенд подключается к промышленной сети питания (220 В, 50 Гц) через автоматический выключатель SF. Выключатель так же служит для защиты высоковольтного трансформатора Т2 от перегрузки по току при пробое газового промежутка между электродами. Блок коммутации (БК) обеспечивает подключение блока регулирования напряжения (БРН) через контакты К1 и К2 магнитного пускателя, включение и выключение которого осуществляется кнопками «Пуск» (S1) и «Стоп» (S2). На обмотку магнитного пускателя напряжение подается через блок-контакт SQ, механически связанный с двер-

цей защитного ограждения (ЗО). Регулирование напряжения осуществляется с помощью автотрансформатора Т1. Напряжение между испытательными электродами определяется по показанию вольтметра PV с уче-

том коэффициента трансформации трансформатора Т2. Блок электродов (БЭ) состоит из приспособления для закрепления электродов, подвода к ним испытательного напряжения и изменения расстояния между ними.

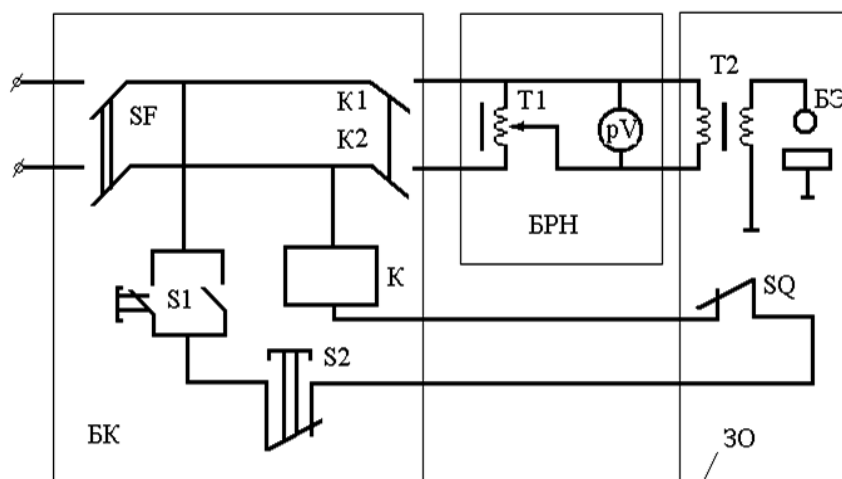


Рис. 1. Электрическая схема стенда

Электрическое поле создавалось с помощью плоских металлических электродов диаметром 150 мм. В зону действия электрического поля были помещены стеклянные ёмкости с испытуемыми теплоносителями (рис. 2). Для предотвращения пробоя по поверхности между верхним электродом и ёмкостями было размещено стекло толщиной 5 мм, диаметром 315 мм, межэлектродное расстояние составило 70 мм. Образцы были выдержаны в течение одного часа при напряжении 14 кВ (50 Гц), кото-

рое соответствовало возникновению коронного разряда на кромках электродов и ионизации воздушных зазоров.

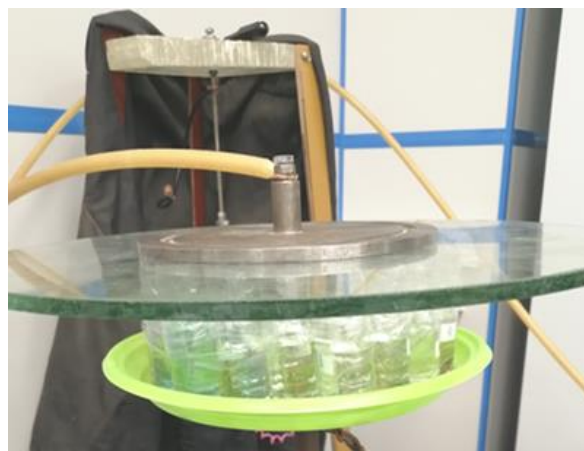
Удельную электропроводность определяли на анализаторе жидкости кондуктометрическом лабораторном «Мультитест КСЛ-101» с платиновыми электродами.

Тонкослойную хроматографию (ТСХ) проводили на хроматографических пластинах «Silufol UV-254».

Каждое измерение для всех испытаний проводили не менее пяти раз.



а



б

Рис. 2. Общий вид испытательного стенда (а) и столик с образцами и высоковольтными электродами (б)

2. Результаты и обсуждения

Безопасная и надежная работа охлаждающих модулей силовых установок зависит от качества теплоносителей, поэтому важно проводить регулярные диагностические мероприятия по контролю их качества.

В таблице приведены результаты измерения удельной электропроводности образцов теплоносителей при температуре 20 °С до и после воздействия электрического поля. В скобках указан основной компонент в составе.

Удельная электропроводность теплоносителей до и после испытания

№ п/п	Марка (основной компонент в составе)	χ , мкСм/см	
		до испытания	после испытания
1	Термолан N (производные олефинов)	0,001	0,001
2	Термолан M (глубокоочищенные минеральные масла)	0,001	0,001
3	Термолан SH (ароматические соединения)	0,001	0,001
4	Термолан LT (производные олефинов)	0,001	0,001
5	Термолан A1 (ароматические соединения)	0,001	0,001
6	Термолан SILICA SL (кремнийорганические соединения)	0,001	0,001
7	Термолан LAB-7 (состав не раскрыт производителем)	0,001	0,001
8	Термолан ECO-65 (пропиленгликоль)	23,66	22,68
9	Термолан F-65 (пропиленгликоль)	933,5	955,7
10	Термолан D50 (этиленгликоль)	51,45	13,14
11	Термолан K-55 (калиевые соли карбоновых кислот)	151,5	145,7

Как видно из полученных экспериментальных данных, для теплоносителей № 1-7 значение удельной электропроводности до и после испытания не изменяется и составляет 0,001 мкСм/см. Это свидетельствует об устойчивости теплоносителей к воздействию электрического поля и способности сохранять свой первоначальный состав.

Хроматограммы теплоносителей, полученные методом ТСХ, также подтверждают данное предположение. Например, на хроматограммах образца 1 (Термолан N) до и после испытания обнаружено по одному пятну округлой формы с фактором распределения $R_f = 0,59$ (элюент изопропиловый спирт).

Наоборот, удельная электропроводность χ низкотемпературных водорастворимых теплоносителей Термолан ECO-65 и Термолан F-65 на основе пропиленгликоля, Термолан D50 на основе этиленгликоля и Термолан K-55 на основе калиевых солей карбоновых кислот меняется после испытания. Причем отклонения от исходного значения наблюдаются как в положитель-

ную (Термолан F-65), так и в отрицательную сторону (Термолан ECO-65, Термолан D50, Термолан K-55).

Высокие значения χ группы низкотемпературных теплоносителей объясняется наличием в его составе пакета функциональных присадок. Наибольшее влияние воздействия электрического поля выявлено на Термолан D50, для которого изменение χ составило 26 %. Для остальных низкотемпературных образцов изменение χ не превышало 4 %.

Анализ экспериментальных данных показывает, что применение в силовых модулях высокотемпературных теплоносителей (образцы 1-7) более предпочтительнее по сравнению с низкотемпературными теплоносителями на основе гликолей (образцы 8-10) и Термолана K-55 (образец 11) ввиду меньшей устойчивости последних к влиянию напряженности электрического поля. Следует отметить, что образцы 1-7, обладающие высокими температурами кипения (293-380 °С), менее склонны к термическо-

му разложению, к пенообразованию, а при контакте с металлами коррозионно малоактивны [14], что делает их более конкурентоспособными теплоносителями в системах охлаждения, минимизируя риск образования коррозии в охладителе.

Заключение

Таким образом, в работе изучено влияние напряженности электрического поля на удельную электропроводность одина-

дцати теплоносителей серии Термолан. Установлено, что высокотемпературные теплоносители Термолан М, Термолан N, Термолан LT, Термолан SH, Термолан A1, Термолан SILICA SL и Термолан LAB-7 не меняют значение удельной электропроводности после испытания, что свидетельствует об их устойчивости и возможности применения в модулях охлаждения силовых установок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гибридный медь-алюминиевый жидкостный охладитель / П.А. Васильев, А.Г. Калинин, Д.Г. Михадаров, Е.Г. Зиновьева // Силовая электроника. 2022. № 4. С. 44-46.
2. Патент RU 217997 U1 от 28.04.2023. Охладитель для силовых полупроводниковых модулей / А.Г. Калинин, П.А. Васильев, Д.Г. Михадаров, И.Н. Васильев, Е.Г. Зиновьева, В.А. Бакшаев, А.А. Байков, О.Г. Иванов. Заявка на полезную модель № 2023102583 от 20.01.2023.
3. "Steel-Copper" Natural Thermocouple for Friction-Welding Technologies / D.G. Mikhadarov, A.G. Kalinin, I.N. Vasiliev, E.G. Zinovieva, Yu.M. Petrosov, P.A. Vasiliev // Russian Electrical Engineering. 2023. Vol. 94. № 8. P. 550-552.
4. **Колпаков А.** Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Ч. 1 // Силовая электроника. 2012. Т. 3. № 36. С. 72-78.
5. **Шулер С., Лиски К., Колпаков А.** Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Ч. 4 // Силовая электроника. 2015. Т. 3. № 54. С. 52-56.
6. Анализ свойств антифризов до и после их эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания / О.И. Телков, А.Д. Космачева, А.А. Ходяков, С.В. Хлопков, И.К. Данилов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 329-338. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-329-338>.
7. **Наглюк М.И.** Влияние температуры на изменение электрической проводимости антифриза // Автомобильный транспорт. 2011. Вып. 29. С. 224-226.
8. Разработка охлаждающих жидкостей нового поколения с улучшенными эксплуатационными свойствами / Н.Ю. Башкирцева, Ю.О. Сладовская, Ю.С. Овчинникова, Е.Е. Ласковенкова, А.А. Сибгатуллин // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 11. С. 24-28.
9. **Есенин В.Н., Денисович Л.И., Журавлев Б.Л.** Коррозия многоэлектродных систем в вводно-гликолевом растворе // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 3. С. 125-130.
10. **Сладовская О.Ю., Чупахина С.А.** Синтез ингибирующих присадок для современных охлаждающих жидкостей // Республиканский конкурс научных работ студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского: сб. науч. тр. Казань, 2008. Т. III. С. 402-404.
11. Контактная коррозия металлов в водной среде / А. А. Степанов, В.Н. Есенин, Л.И. Денисович, Б.Л. Журавлев // Защита металлов. 2007. Т. 43. № 4. С. 1-7.
12. **Зиновьева Е.Г., Михадаров Д.Г., Калинин А.Г.** Применение жидких теплоносителей для металлоконструкций и сооружений // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: сборник материалов IX Всерос. конф., посвященной 55-летию Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова». Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. С. 16.
13. **Зиновьева Е.Г., Калинин А.Г., Михадаров Д.Г.** Определение удельной теп-

лостности теплоносителей для алюминиево-медных конструкций // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: сб. материалов VI Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. С. 256-259.

14. **Zinovjeva E.G., Kalinin A.G., Mikhadarov D.G.** Studying the properties of heat carriers for aluminum-copper structures // Butlerov Communications B. 2023. Vol. 5. № 1. Id.10. DOI: 10.37952/ROI-jbc-B/23-5-1-10.

Зиновьева Елена Геннадьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Общая, неорганическая и аналитическая химия» Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова

Кравченко Галина Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологии, электрооборудования и автоматизированных производств Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова

Калинин Алексей Германович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехнологии, электрооборудования и автоматизированных производств Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова

Михадаров Денис Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологии, электрооборудования и автоматизированных производств Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова

Ефремов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры электротехнологии, электрооборудования и автоматизированных производств Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова

Elena G. Zinovjeva – PhD (Chemical Sciences), Associate Professor, Department of General Inorganic and Analytical Chemistry, Chuvash State University

Galina A. Kravchenko – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Technologies, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University

Aleksey G. Kalinin – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Head: Department of Electrical Technologies Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University

Denis G. Mikhadarov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Technologies, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University

Dmitry A. Efremov – Postgraduate, Department of Electrical Technologies, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University

Статья поступила в редакцию 02.02.24, принята к опубликованию 14.03.24

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518.3

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ВЫБОРА ДАТЧИКОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ УРОВНЕМЕРОВ

С.В. Макартичян, М.А. Богале, Л.А. Коновалова, А.В. Вершинин

INTELLIGENT SUPPORT FOR THE SENSORS APPLIED IN INFORMATION-MEASURING SYSTEMS USING THE EXAMPLE OF LEVEL GAUGES

S.V. Makartichyan, M.A. Bogale, L.A. Konovalova, A.V. Vershinin

В настоящее время одной из основных проблем проектирования информационно-измерительных систем является обоснованный выбор датчиков, поскольку на рынке представлено большое количество вариантов. Основная задача в том, как выбрать наиболее оптимальный вариант из большого количества. В статье приведена методика морфологического синтеза информационно-измерительных систем, на основе метода анализа иерархий, который позволяет из большого количества вариантов датчиков по нескольким критериям выбирать наиболее оптимальный вариант. Распределение приоритетов для критериев и датчиков определяется с помощью парных сравнений между всеми парами вариантов. Синтез системы выполняется в два этапа: сначала определяются приоритеты критериев – параметров и характеристик, а затем с учетом приоритета критерия определяется вариант датчика. Эта методика позволяет учитывать особенности характеристик и параметры всех датчиков. В качестве примера приведен выбор оптимального варианта датчика контроля уровня в водоемах гидроэлектростанций

Currently, one of the main challenges in the design of information measurement systems is making an appropriate choice of sensors, since the market provides a variety of options. The main problem is how to find an optimal value among the high number of options. The paper presents a methodology for morphological synthesis of information-measuring systems using the method of hierarchy analysis, which allows finding a perfect option from a variety of sensors based on several criteria. Distribution of prioritized criteria and sensors is determined using pairwise comparisons between all the pairs of options. A two-step approach is applied for the system synthesis: first, the priorities of the criteria, including parameters and characteristics are determined; then, the type of sensor is chosen with account for the prioritized criterion. This technique takes into account the characteristics and parameters of all the sensors. As an example, selection of an optimal version of a level control sensor used in reservoirs of hydroelectric power stations (HPP) is given. It should be noted that hydroelectric power stations are sources of power

(ГЭС). Необходимо отметить, что ГЭС являются источниками электроснабжения крупных электротехнологических предприятий алюминиевой промышленности.

Ключевые слова: *методы и средства измерения уровня, эвристические методы проектирования, метод анализа иерархий, парные сравнения, матрица смежности, комплексные приоритеты*

Введение

Одна из основных мировых проблем жизнеобеспечения населения на планете – это обеспечение водными ресурсами, причем в последнее время в связи с изменениями климата эта проблема ухудшается. Большую роль в хранении и распределении водных ресурсов играют водохранилища гидроэлектростанций. Однако управление водными ресурсами является довольно сложной задачей, поскольку необходимо контролировать и прогнозировать баланс водных ресурсов, а именно приход и расход. Приход и расход водных ресурсов зависит от многих факторов: метеорологических и гидрологических условий, объемов потребления водных ресурсов и электроэнергии населением, промышленностью, сельским хозяйством и требованиями экологии. Стратегия управления гидроэлектростанцией обычно разрабатывается на основе предыдущих метеорологических и гидрологических условий и информации о задержке и текущем уровне воды в водохранилище. В зависимости от уровня воды и прогнозов ее поступления принимаются решения о досрочном сбросе воды, который позволяет избежать риска наводнений в районах ниже по течению. Уровень воды в водохранилище определяет выходную мощность гидроэлектростанции, а колебания уровня воды приводят к изменениям выходной мощности генераторов. Поэтому точное прогнозирование уровня воды в водохранилище гидроэлектростанции очень важно при планировании выработки электроэнергии. Правильное и эффективное планирование энергопотребления позволяет обеспечить стабильное снабжение потреби-

supply to large electrical technological enterprises associated with the aluminum industry.

Keywords: *methods and means of level measurement, heuristic design methods, hierarchy analysis method, pairwise comparisons, adjacency matrix, complex priorities*

лей электроэнергией. Очевидно, что нейронная сеть должна входить в информационно-измерительную систему (ИИС), содержащую датчики физических величин и управляющую ЭВМ.

Для решения этой проблемы была разработана информационно-измерительная система регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС. ИИС содержит две группы датчиков основных факторов, влияющих на уровень воды: климатические и водные. Климатические датчики: температуры воздуха 1, уровня осадков 2, уровня снежного покрова 3, влагосодержания почв 4, глубины промерзания 5, которые установлены на берегу реки. Водные датчики: испарения воды 6, находящиеся на поверхности воды, уровня воды 7, расхода притока 8 и водопотребления 9, размещенные под водой. Все датчики, и климатические, и водные, размещены по обеим сторонам плотины. Датчики 1-9 соединены с управляющей ЭВМ 13, содержащей нейронный процессор 14, который формирует прогноз притока и уровня воды в водохранилище и на основании этой информации планирует расход воды по потребителям с учетом их приоритетов и риска наводнения, и интерфейс 15. ЭВМ 13 осуществляет управление затвором водосброса 10 через электропривод 12. Необходимо отметить, что основными датчиками ИИС являются уровнемеры, которые на рынке представлены достаточно широко. Также разработано большое количество других датчиков, и поэтому основная задача при проектировании ИИС состоит в выборе оптимального варианта из большого их количества.

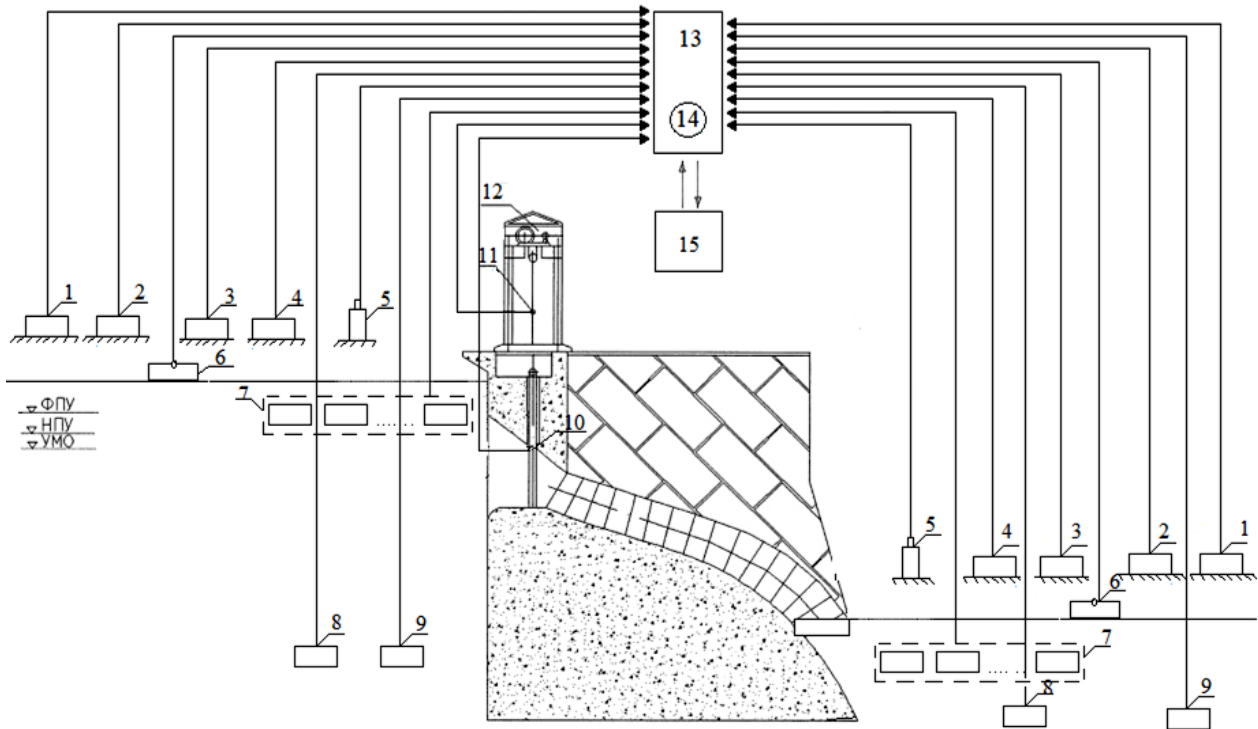


Рис. 1. Система автоматического регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС

Анализ основных методов измерения уровня жидкостей

Радарные уровнемеры. Принцип действия радарного уровнемера основан на измерении времени переотражения высокочастотных радиоволн от поверхности раздела сред: воздух – жидкость. Результатом измерения является значение расстояния от источника сигнала до поверхности жидкости. В радарных уровнемерах применяются СВЧ сигналы с несущей частотой, лежащей в диапазоне от 5,8 до 26 ГГц. В настоящее время в радарных системах применяются в основном две технологии: с непрерывным частотно-модулированным излучением (FMCW) и импульсным излучением сигнала. В радарах импульсного типа определение расстояния основано на непосредственном измерении времени прохождения СВЧ-импульса от излучателя до поверхности жидкости и обратно. Время прохождения сигналом расстояния в несколько метров составляет единицы наносекунд. В результате преобразования к обработке сигналов радарного уровнемера применяются схемы, которые используются в акустических указателях уровня жидкости.

Преимущества. Радарные уровнемеры имеют большую устойчивость к таким факторам как запыленность, испарения с контролируемой поверхности, пенообразование, обладают высокой точностью.

Недостатки. Высокая стоимость.

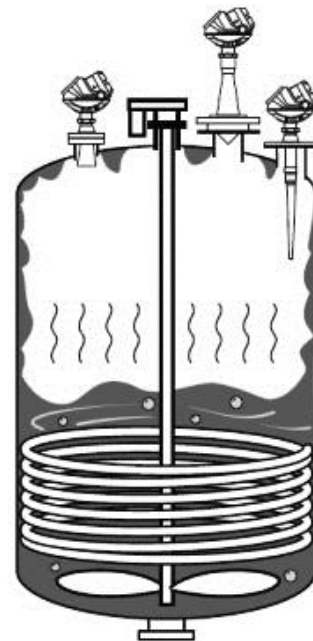


Рис. 2. Бесконтактные радары с антеннами различных типов

Ультразвуковые уровнемеры. Ультразвуковой уровнемер в процессе работы посылает ультразвуковые импульсы вниз по направлению к среде, уровень которой необходимо измерять. Ультразвуковой импульс распространяется в пространстве со скоростью звука. Отразившись от поверхности жидкости, импульс возвращается в приемник уровнемера. Электроника измеряет время задержки между моментом излучения и приема отраженного импульса. Далее встроенный микропроцессор вычисляет расстояние до поверхности жидкости.

Преимущества. Отсутствие контакта со средой, возможность использования в загрязненной среде, а также в разных жидкостях, независимость от плотности жидкости.

Недостатки. Большой угол излучения, что ограничивает область применения, на сигнал оказывают влияние пыль, пар, газовые смеси и пена, образующаяся на поверхности.

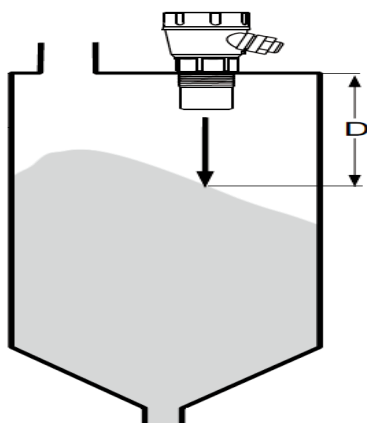


Рис. 3. Принцип действия ультразвукового датчика

Датчики давления. Измерение уровня гидростатическими уровнемерами основано на уравнивании давления столба жидкости в резервуаре с давлением столба жидкости, которая заполняет измерительный прибор, или реакцией пружинного механизма прибора. Типичное применение гидростатических уровнемеров – для однородных жидкостей в емкостях без существенного движения рабочей среды, а также для вязких жидкостей. По конструкции гидростатические датчики делятся на два типа:

стационарные (мембранные) или погружные (колокольные). В первом случае датчик соединен с мембраной и прибор устанавливается внизу резервуара. В случае погружного датчика чувствительный элемент погружен в рабочую среду и передает давление жидкости на сенсор через столб воздуха, запаянный в подводящей трубке.

Преимущества. Датчики давления являются экономичными приборами, а также они просты по конструкции и в эксплуатации.

Недостатки. Относительно низкая (по сравнению с другими методами) точность измерения и ограниченность применения из-за того, что монтаж устройства на дне резервуара требует постоянной плотности среды.

Электрические уровнемеры. В электрических уровнемерах уровень жидкости преобразуется в какой-либо электрический сигнал. Электрические уровнемеры бывают ёмкостные и кондуктометрические. В ёмкостных уровнемерах чувствительным элементом служит преобразователь – конденсатор, ёмкость которого меняется пропорционально изменению уровня жидкости. Преобразователи могут быть цилиндрического или пластинчатого типов, а также в виде жесткого стержня. Покрытие обкладок тонкими пленками применяют при измерении уровня электропроводных жидкостей. Действие кондуктометрического указателя уровня жидкости основано на измерении сопротивления между электродами, помещенными в измеряемую среду (одним из электродов может быть стенка резервуара или аппарата). Кондуктометрические уровнемеры используют для сигнализации и поддержания в заданных пределах уровня исключительно электропроводных жидкостей в емкостях, бойлерах, контейнерах или открытых каналах, а также для управления насосами в дренажах, водных установках и емкостях.

Преимущества. Высокая надёжность, могут применяться в широком диапазоне технологических параметров, в частности в условиях переменной плотности, повышенных температур и высоких давлений (до 345 бар). Невысокая стоимость датчиков.

Недостатки. Высокая чувствительность к изменению электрических свойств жидкостей. Необходимость настройки прибора для конкретной жидкости.

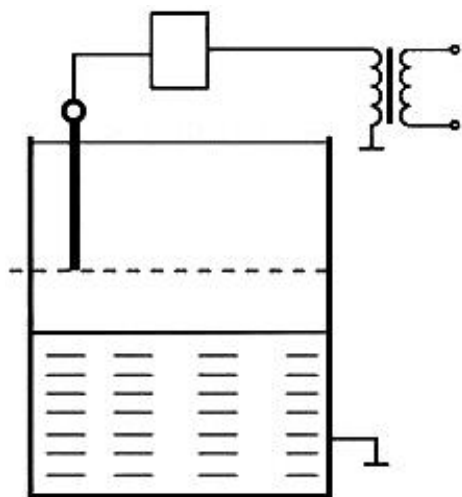


Рис. 4. Схема кондуктометрического уровнемера

Магнитострикционные уровнемеры. Магнитострикционные устройства определяют момент пересечения двух магнитных полей, одно из которых создается магнитом поплавка, а другое – волноводом. Электроника генерирует токовый импульс малой мощности, распространяющийся по волноводу, и, когда магнитное поле импульса взаимодействует с полем, создаваемым магнитом поплавка, возникает «скручивание» чувствительного элемента. При этом создается ультразвуковая волна, время распространения которой измеряется электроникой уровнемера.

Преимущества. Магнитострикционные уровнемеры отличаются низкой погрешностью измерений (± 1 мм). Одним уровнемером можно измерять уровень, а также температуру процесса в одной или нескольких точках.

Недостатки. Поплавок магнитострикционного уровнемера должен находиться в непосредственном контакте с технологической средой. На нем возможно образования отложений, способных привести к потере подвижности; поплавки могут подвергаться коррозии и подходят для измерения уровня только жидких сред.

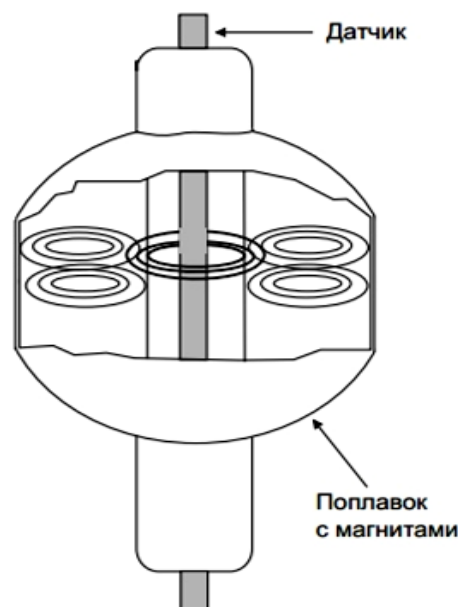


Рис. 5. Общий вид магнитострикционного уровнемера

Поплавковые уровнемеры. В поплавковых уровнемерах чувствительным элементом является поплавок, и измерение происходит по оценке его положения на поверхности жидкости или границе раздела двух сред. Часто в основе таких уровнемеров лежит принцип магнитострикции. По-другому эти устройства называются магнитострикционные поплавковые уровнемеры. Этот принцип измерения очень точен и часто применяется для коммерческого учета. Точность измерения при таком методе составляет 1 мм. Типичным применением поплавковых уровнемеров является измерение уровня топлива, масел, легких нефтепродуктов в относительно небольших емкостях и цистернах. Поплавковый метод может с успехом применяться в случае пенящихся жидкостей.

Преимущества. Благодаря простой конструкции с небольшим количеством элементов поплавковые уровнемеры просты в обслуживании и имеют самую невысокую стоимость по сравнению с остальными разновидностями датчиков уровня.

Недостатки. Наличие движущихся частей (поплавков) и ограничение по максимальному давлению среды. Нельзя применять в средах, образующих налипание или отложение осадка на поплавки.

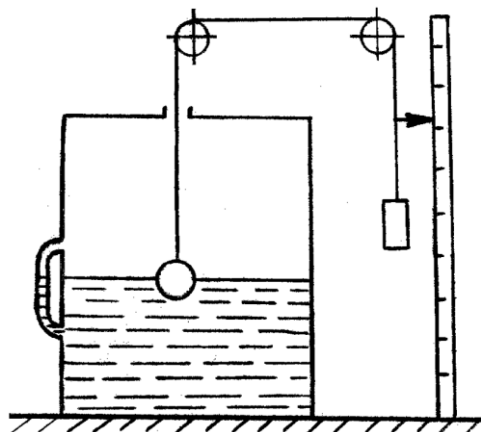


Рис. 6. Конструкция поплавкового механизма измерения

Интеллектуальная поддержка выбора датчиков ИИС

Одним из основных датчиков ИИС управления режимами работы ГЭС являются датчики уровня воды в водоемах. В настоящее время существует большое разнообразие датчиков перемещения, которые имеют свои преимущества и недостатки [1-2]. Поэтому практически сложно выбрать датчик, который бы удовлетворял всем требованиям задачи. Поэтому необходим обоснованный выбор типа и конструкции датчика. Для этого необходимо предварительно выбрать критерии выбора датчика для конкретной задачи.

Чтобы выбрать технические решения из множества вариантов и с множеством параметров и характеристик, целесообразно использовать эвристические [3-4] и морфологические методы анализа [5]. На основе морфологического метода была разработана авторами методика выбора оптимального варианта из большого множества [6], которая была использована в электротехнической промышленности для функционально стоимостного анализа. Эта методика была доработана для использования при проектировании ИИС авторами [7], кроме того, была также разработана программа для ЭВМ. Предложенная методика использует парное сравнение вариантов с помощью таблиц.

На основе анализа особенности и условий работы датчика уровня выявлены основные критерии выбора:

Таблица 1 – Основные критерии уровнемеров

№	Параметры	Обозначения
1	Передача информации	k_1
2	Надёжность	k_2
3	Точность	k_3
4	Стоимость	k_4
5	Простота конструкции	k_5
6	Система питания	k_6

Для начала рассмотрим упрощенную операцию расстановки приоритетов для каждого критерия по степени важности. Для этого составим матрицу (табл. 2) и методику заполнения на примере выбора уровнемера для открытых и закрытых резервуаров и хранилищ. Каждый столбец и строка соответствуют определенному критерию. На пересечении столбца и строки ставится номер того критерия, который является более важным при парном сравнении. Итоговые суммы предпочтений по каждой строке позволяют ранжировать выбранные критерии. На рис. 7 изображена гистограмма критериев, из которой следует, что предпочтение отдается системе питания. Это объясняется тем, что датчик уровня может быть расположен на большой территории водоема.

Таблица 2 – Приоритеты выбранных параметров

Индекс	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	Кол-во предпочтений
k_1	—	1	1	1	1	6	4
k_2	1	—	3	2	2	6	2
k_3	1	3	—	3	3	6	3
k_4	1	2	3	—	5	6	0
k_5	1	2	3	5	—	6	1
k_6	6	6	6	6	6	—	5

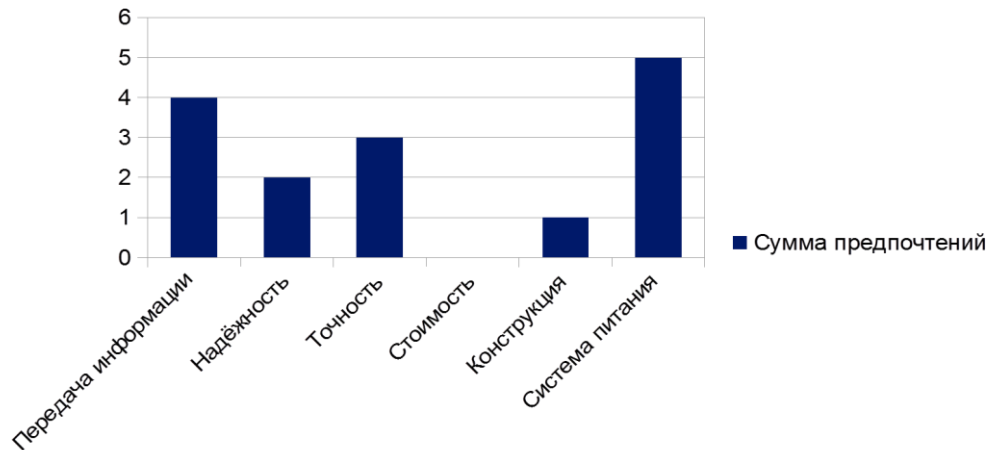


Рис. 7. Гистограмма распределения критериев по важности

Этот способ расстановки приоритетов критериев может давать ошибки, поэтому была разработана улучшенная методика с операциями усреднения. Оценка приоритетов по вышеуказанному способу проводится с использованием комплексных приоритетов $P_{i\text{ном}}$ по формуле

$$P_{i\text{ном}} = \sum_{j=1}^n \beta'_j P_{ij},$$

где β'_j – относительный приоритет (значимость) j -го критерия; P'_{ij} – относительный

приоритет i -го варианта по j -му критерию; n – количество критериев ($n = 6$).

Следующим шагом является последовательное определение абсолютных приоритетов вариантов P_{ij} , а затем относительных P'_{ij} , которые рассчитываются в долях единицы.

Из результатов анализа следует, что наиболее важным критерием, как и по результатам предыдущего анализа, является система питания, поскольку это определяет работоспособность преобразователя.

Таблица 3 – Матрица парных сравнений критериев

Индекс	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	Σ	β	β^*
k_1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	7,5	41,25	0,21
k_2	0,5	1	0,5	1,5	1,5	0,5	5,5	28,25	0,15
k_3	0,5	1,5	1	1,5	1,5	0,5	6,5	34,25	0,18
k_4	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	3,5	19,25	0,09
k_5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	0,5	4,5	23,25	0,12
k_6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	7,5	48,75	0,25
ИТОГО								195	1

Далее определим оптимальный вариант датчика с учетом всех критериев, т. е. проведем многокритериальный анализ вариантов датчика. Задача решается на основе квадратной матрицы смежности, которая составляется и решается, как и в предыдущей операции. Каждое устройство (датчик) может иметь преимущество по каким либо критериям в сравнении с

другими, и поэтому на втором этапе выполняется морфологический анализ датчиков по каждому критерию, т. е. какой датчик в большей степени удовлетворяет этому критерию. На этом этапе для каждого критерия создаются квадратные матрицы (табл. 2-7). Номер варианта указан в столбцах и строках, а на пересечении – коэффициенты (1,5; 1,0; 0,5), которые указывают,

какой вариант предпочтительнее в соответствии с этим критерием.

Рассмотрим методику выбора с учётом частных критериев $k_1, k_2 \dots k_6$ из шести вариантов. Затем для каждого из критериев строятся матрицы смежности. Вариантами в этом случае будут: X_1 – поплавковый уровнемер; X_2 – ультразвуковой уровнемер; X_3 – магнитострикционный уровнемер; X_4 – радарный уровнемер; X_5 – электрический уровнемер; X_6 – датчик давления. В столбцах и строках пишутся номера вариантов, а на пересечении – коэффициенты (1,5; 1,0; 0,5), указывающие, какой вариант предпочтительнее.

Аналогично составляются и решаются матрицы по остальным критериям. Далее результаты всех предыдущих матриц заносятся в табл. 5, а затем рассчитывается комплексный показатель (приоритет) для каждого из вариантов $P_{i\text{ном}}$, который определяется как сумма произведений относительных приоритетов объекта и относительных приоритетов критериев. В последней строке указываются комплексные приоритеты, полученные путем сложения продуктов элементов первого столбца и следующих столбцов таблицы.

Таблица 4 – Матрица смежности по первому критерию

Индекс	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Σ	P_1	P_1^*
x_1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	3,5	19,75	0,1
x_2	1,5	1	0,5	0,5	0,5	1,5	5,5	28,75	0,14
x_3	1,5	1,5	1	1,5	0,5	1,5	7,5	41,75	0,21
x_4	1,5	1,5	0,5	1	0,5	1,5	6,5	34,75	0,17
x_5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1,5	8,5	49,75	0,25
x_6	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	4,5	23,75	0,13
ИТОГО								198,5	1

Таблица 5 – Комплексные приоритеты альтернатив

Критерии значимости	Относительный приоритет по каждому варианту					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
0,21	0,021	0,0294	0,0441	0,0357	0,0525	0,0273
0,15	0,015	0,0255	0,021	0,0315	0,0375	0,0195
0,18	0,018	0,0252	0,0306	0,0378	0,045	0,0234
0,09	0,0225	0,0126	0,009	0,0117	0,0153	0,0189
0,12	0,0108	0,024	0,0144	0,024	0,03	0,0168
0,25	0,025	0,0425	0,035	0,0525	0,0625	0,0325
Комплексные приоритеты	0,1123	0,1592	0,1541	0,1932	0,2428	0,1384

Вариант, получивший наибольшее значение $P_{ком} = 0,2428$, может считаться лучшим из сравниваемых устройств. Поэтому вариант X_5 – электрический уровнемер считается оптимальным решением для реализации контроля уровня жидкостей в резервуарах.

Выбор датчика с помощью автоматизированной системы

Аналогично заполняются матрицы для программного комплекса и автоматически рассчитываются.

При морфологическом анализе выбора

Метод попарного сравнения

Определение коэффициентов значимости критериев выбора блока № 1 **уровнемер**

	крит. 1	крит. 2	крит. 3	крит. 4	крит. 5	крит. 6
1. передача информации	1	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	0,6667
2. надежность	0,5	1	0,5000	2,0000	2,0000	0,5000
3. точность	0,5	2	1	2,0000	2,0000	0,5000
4. стоимость	0,5	0,5	0,5	1	0,5000	0,5000
5. простота конструкции	0,5	0,5	0,5	2	1	0,5000
6. система питания	1,5	2	2	2	2	1

Определить неизвестные коэффициенты

Согласованность: 0,0379

Далее >>

Рис. 6. Матрица для программного комплекса

Метод попарного сравнения

Определение абсолютных приоритетов альтернатив реализации блока № 1 **уровнемер**

Критерий выбора **передача информации**

	альт. 1	альт. 2	альт. 3	альт. 4	альт. 5	альт. 6
1. поплавковый уровнемер	1	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
2. ультразвуковой уровнемер	2	1	0,5000	0,5000	0,5000	2,0000
3. магнитострикционный уровнемер	2	2	1	2,0000	0,5000	2,0000
4. радарный уровнемер	2	2	0,5	1	0,5000	2,0000
5. электрический уровнемер	2	2	2	2	1	2,0000
6. датчик давления	2	0,5	0,5	0,5	0,5	1

Определить неизвестные коэффициенты

Согласованность: 0,0437

Далее >>

Просмотр результатов

РЕЗУЛЬТАТ ВЫБОРА БЛОКОВ 30.12.2023 20:10

Блок № 1 : уровнемер

Вектор приоритетов критериев:

- 0,2304 - передача информации
- 0,1382 - надежность
- 0,1768 - точность
- 0,0858 - стоимость
- 0,1078 - простота конструкции
- 0,2610 - система питания

Вектор приоритетов альтернатив:

- 0,1016 - поплавковый уровнемер
- 0,1582 - ультразвуковой уровнемер
- 0,1554 - магнитострикционный уровнемер
- 0,1977 - радарный уровнемер
- 0,2670 - электрический уровнемер
- 0,1201 - датчик давления

Выбрана техническая реализация: электрический уровнемер

Рис. 7. Матрица для программного комплекса

оптимального варианта технического решения было использовано две методики: ручная с аддитивным определением границ (0,5-1,5) и автоматическая с мультипликативным определением (0,5-2). Результаты по обеим методикам полностью совпадают. Кроме того, автоматическая программа позволяет определять согласованность решения за счет дополнительной обработки, что позволяет повысить достоверность выбора.

Заключение

По надёжности и функциональным характеристикам предпочтительны уровнемеры электрического типа, поскольку они имеют довольно простую конструкцию. Выходной электрический сигнал при емкостной реализации датчика сравнительно просто преобразуется в цифровую форму.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Левшина Е.С., Новицкий П.В.** Электрические измерения физических величин. (Измерительные преобразователи). Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

2. ГОСТ Р 8.660-2009 ГСИ. Уровнемеры промышленного применения. Введ. 2009-12-15. Москва: Изд-во стандартов, 2010.

3. **Мюллер И.** Эвристические методы в инженерных разработках: пер. с нем. Москва: Радио и связь, 1984. 144 с.

4. **Саати Т.Л.** Принятие решений при зависимости и обратных связях: Аналитические сети. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 360 с.

5. **Одрин В.М.** Метод морфологического анализа технических систем. Москва: ВНИИПИ, 1989. 312 с.

6. **Моисеева Н.К., Карпунин М.Г.** Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа. Москва: Высшая школа, 1988. 192 с.

7. **Шилин А.Н., Шилина И.А.** Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 3. С. 51-61.

8. Пат. 2629456 Российская Федерация, МПК G 05 D 9/12, G 06 G 7/50, G 06 F 17/10. Система автоматического регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС / Козырев А.В., Лашин А.В., Семёнов В.А., Турунин В.И.; патентообразователь Открытое акционерное общество «Ленгидропроект» – № 2014143616; заявл. 28.10.2014; опубл. 29.08.2017. Бюл. № 14. 10 с.

9. **Borden C., Dimple R.** Water quality monitoring system design. Manitoba: International Institute for Sustainable Development, 2015.

10. **Younos Tamim, d Christopher J. Heyer.** Advances in water sensor technologies and real-time water monitoring // Advances in Watershed Science and Assessment. Springer, Cham, 2015. 171-203.

11. **Sauer Vernon B., D. Phil Turnipseed.** Stage measurement at gaging stations. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2010.

12. Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams / Adamo Nasrat et al. // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2021. 11.1. P. 145-202.

Макартичан Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Богале Мулуken Асамнеу – аспирант кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Sergei V. Makartichyan – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University

Bogale Muluken A. – Postgraduate, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University

Коновалова Людмила Александровна – старший преподаватель кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Lyudmila A. Konovalova – Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University

Вершинин Андрей Владимирович – студент направления «Приборостроение» кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Andrei V. Vershinin – Undergraduate, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 25.01.24, принята к опубликованию 14.03.24

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.42, 621.398

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ТЕЛЕМЕТРИИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 10 (6) кВ

П.А. Кузнецов, И.О. Шкода,
А.В. Ладин, И.Г. Кузнецов, В.В. Богданова

ANALYSIS OF MODERN SOLUTIONS IN THE FIELD OF TELEMETRY TRANSFORMER SUBSTATIONS 10 (6) kV

P.A. Kuznetsov, I.O. Shkoda,
A.V. Ladin, I.G. Kuznetsov, V.V. Bogdanova

В статье представлен анализ современных решений в области телеметрии трансформаторных подстанций 10 (6) кВ. Дана оценка актуальности данной темы и текущего уровня ее научно-технической проработки. По результатам анализа сформулированы недостатки существующих систем телеметрии. Предложен оптимальный перечень контролируемых параметров, сформулированы общие требования к системам телеметрии подстанций 10 (6) кВ.

Ключевые слова: подстанция, трансформатор, телеметрия, электрооборудование, контролируемые параметры

Регламент контроля состояния трансформаторных подстанций 10 (6) кВ. Актуальность темы.

В настоящее время, как правило, контроль состояния трансформаторных подстанций 10 (6) кВ (далее – ПС) осуществляется в форме визуального осмотра и диагностики электрооборудования в рамках их планового обслуживания и без применения специальных систем мониторинга и контроля состояния подстанционного оборудо-

The paper presents the analysis of modern solutions in the field of telemetry of transformer substations 10 (6) kV. The relevance of this topic and the current level of its scientific and technical development are assessed. According to the results of the analysis the disadvantages of existing telemetry systems are formulated. An optimal list of controlled parameters is proposed, and general requirements for telemetry systems of 10 (6) kV substations are formulated.

Keywords: substation, transformer, telemetry, electrical equipment, monitored parameters

ования. Регламенты этих работ описаны в действующих нормативных документах [1-4].

Так, согласно [1] осмотры на объектах без постоянного дежурства персонала должны проводиться не реже 1 раза в месяц, а в трансформаторных и распределительных пунктах – не реже 1 раза в 6 месяцев. Такой подход не обеспечивает требуемого качества контроля, т. к. не обеспечивает устранение риска развития дефектов

и отказов оборудования в межосмотровый период. Кроме того, при визуальном осмотре без применения специальных устройств диагностики невозможно выявить существенную долю дефектов.

Кроме осмотров на ПС также проводятся ремонты электрооборудования. Согласно регламенту [1] их периодичность составляет 3 раза в год. Несмотря на то, что проверку состояния электрооборудования при ремонте проводят более качественно, в т. ч. с использованием диагностических средств, межремонтный интервал в 3 года практически не снижает риски отказов и, как следствие, аварий на ПС и связанных с ними ущербов.

Подтверждением вышеописанного является существующая статистика аварий на ПС 10(6) кВ. К примеру, за 2022 год в филиале ПАО «Россети Волга» – Саратовские распределительные сети [5] зарегистрировано 354 аварийных ремонта на ПС 10 (6) кВ.

Для снижения вероятности отказов электрооборудования, сокращения аварийности на ПС, и, как следствие, снижения ущербов от аварий и последствий их устранения необходимы разработка и внедрение стационарных информационно-измерительных систем телеметрии состояния ПС 10(6) кВ, работающих автоматически, дистанционно, и в реальном масштабе времени.

Анализ существующих разработок

Исследования в области контроля состояния электрооборудования ПС 10 (6) кВ ведутся уже давно, на сегодняшний день зарегистрированы различные способы и устройства контроля повреждений на ПС. Например, авторами патента RU 2779269 [6] предлагается изобретение, предназначенное для определения дефектов изоляции силовых трансформаторов по наличию частичных разрядов, регистрируемых акустическим методом (см. рис. 1).

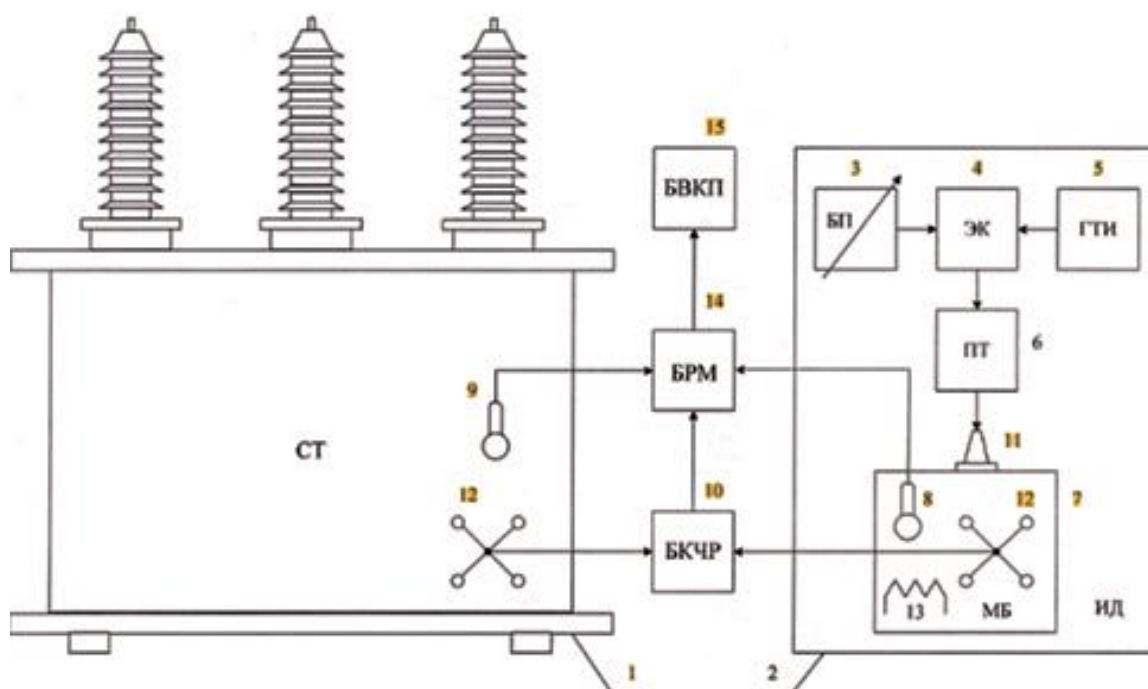


Рис. 1. Структурная схема изобретения (патент RU 2779269)

Работа устройства заключается в одно-временных измерениях сигналов на трансформаторе и имитаторе дефектов. Если при изменении температуры значение напряжения на имитаторе дефектов не изменяется, значит, дефект не развивается во времени,

а увеличение амплитуды связано с изменениями свойств трансформаторного масла. Если при изменении параметров акустического сигнала наблюдается увеличение напряжения на имитаторе дефектов при сезонном изменении температуры, то наблю-

дается развитие дефекта диагностируемого трансформатора.

Авторами другого патента RU 162784 [7] предлагается устройство для постоянного мониторинга режима работы силового трансформатора, выявление на ранней ста-

дии развития витковых замыканий в обмотках трансформатора для предотвращения перехода ненормального режима работы трансформатора в аварийный и своевременное выявление основных причин, приводящих к отказам трансформаторов (см. рис. 2).

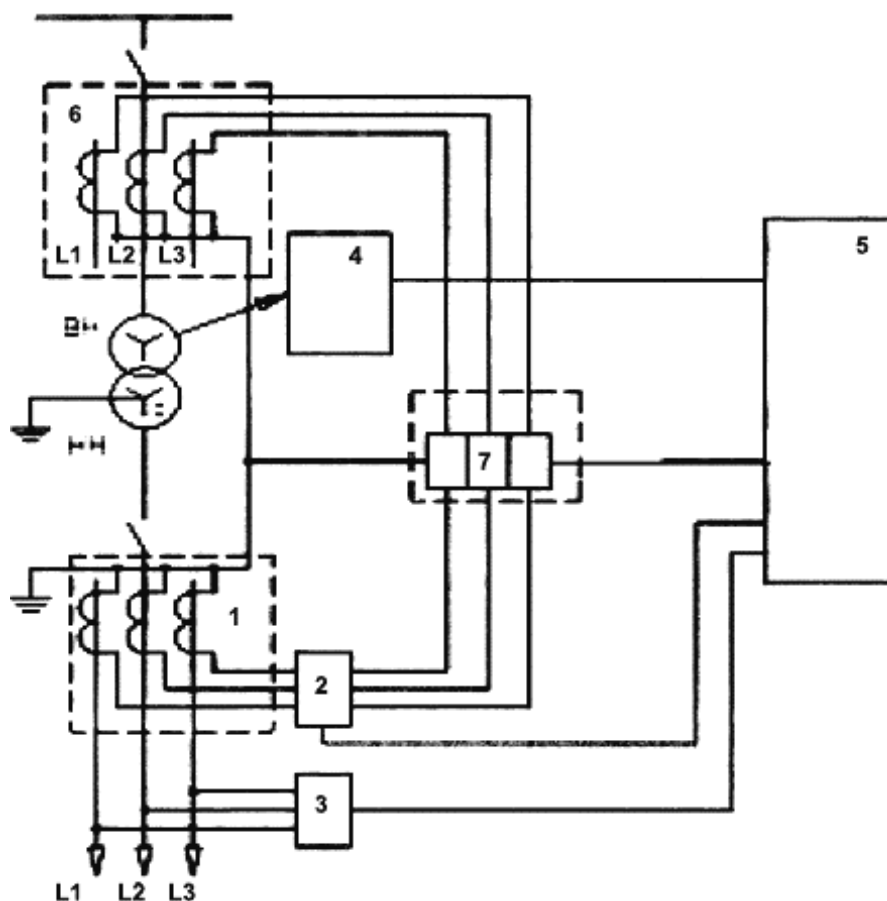


Рис. 2. Электрическая схема изобретения (патент RU 162784)

Для комплексной оценки состояния ПС 10 (6) кВ запатентовано изобретение RU 2403581 [8]. Предлагаемая в нем система проводит измерение и регистрацию диагностических параметров в условиях комплекса эксплуатационных воздействий в режиме мониторинга. Измеренные и зарегистрированные параметры сопоставляют с нормированными значениями. Определяют диагностические параметры, которые превысили нормированные значения, и соответствующие им показатели, характеризующие уменьшение стойкости к отказу. Определяют время ожидаемого отказа на основе его расчетной зависимости.

Предложенные авторами изобретения обладают рядом существенных недостатков затрудняющих их применение. Например, в патенте RU 2779269 недостатком является режим калибровки заявленного устройства, при котором трансформатор необходимо отключать от сети и от нагрузки. В патенте RU 162784 недостатком является необходимость установки в каждой фазе трансформаторов тока, как на стороне высшего, так и на стороне низшего напряжения. В патенте RU 2403581 недостатком изобретения является отсутствие возможности распознавания видов повреждений. Результаты оценки этих и других изобретений в данной области представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Оценка недостатков и уровня технической реализации существующих разработок

№ патента	Недостатки изобретений	Уровень технической реализации
RU 105536	Отсутствует комплексная оценка состояния оборудования	Отсутствует
RU 2779269		Опытный образец
RU 162784		Существует
RU 2328009		Опытный образец
RU 136897		Существует
RU 2727526	Не учитываются неэлектрические параметры	Опытный образец
RU 2403581	Представлены интегральные данные о состоянии оборудования, без локализации и распознавания повреждения	Отсутствует

Также следует отметить, что для дистанционного контроля значимых параметров силового трансформатора 10 (6) кВ – влажность и качество трансформаторного масла, изобретательских предложений не обнаружено.

Обобщая результаты анализа, можно сделать вывод, что на сегодняшний день нет предложений по комплексному мониторингу состояния ПС 10 (6) кВ, при котором учитывались бы все критические параметры состояния оборудования и проводилась бы оценка динамики и рисков развития дефектов.

Авторами предлагается разработать систему телеметрии трансформаторных подстанций 10 (6) кВ, предназначенную для дистанционного, в реальном масштабе времени мониторинга критических параметров состояния ПС 10 (6) кВ. Первоочередной задачей в этом вопросе является необходимость сформулировать критические параметры, которые эта система должна контролировать.

Перечень контролируемых системой параметров.

По мнению авторов в оптимальный перечень контролируемых системой параметров, необходимых и достаточных для принятия оперативных решений диспетчерским персоналом в рамках эксплуатации ПС 10 (6) кВ, должны войти следующие параметры и соответствующие способы их измерения:

1. Контроль температуры обмоток трансформатора. В маслонаполненных трансформаторах оптимальным решением является косвенный контроль температуры обмоток через измерение температуры трансформаторного масла (так как оно обладает хорошей теплопроводностью), для этого необходима установка двух датчиков температуры в верхней и нижней точке масляного бака. В качестве датчиков температуры оптимально использование терморезистивных датчиков, которые должны быть выполнены в герметичном корпусе.

Для контроля температуры обмоток сухих трансформаторов датчики следует устанавливать в центр каждой из обмоток. Они должны иметь плоский корпус для облегчения установки в центре обмотки, при этом необходимо, чтобы их изоляция была рассчитана на рабочее напряжение трансформатора, также в качестве дополнительных мер безопасности необходимо применение гальванической развязки.

2. Контроль уровня масла в баке силового трансформатора. Масло в трансформаторе выполняет две функции: служит диэлектриком, заполняя свободное пространство между витками обмоток, и выполняет функцию отвода тепла от них. Снижение уровня масла может привести к выходу трансформатора из строя. Для контроля уровня масла возможно

применение поплавковых датчиков различной конструкции.

3. Контроль концентрации образовавшихся газов в трансформаторном масле. С помощью определения концентрации таких газов как H_2 , CH_4 , C_2H_6 , CO_2 , C_2H_4 , CO , C_2H_2 и их пропорций можно определить характер повреждений в силовом трансформаторе. Для определения концентрации данных газов предлагается использовать потоковый газоанализатор.

4. Контроль качества изоляции. Выявление дефектов изоляции на ранней стадии позволит избежать крупного развития аварии. Для этого необходим контроль токов утечки с применением трансформаторов тока (ДТ1 и ДТ2), установленных на вводах силового трансформатора со стороны ВН и НН, включенных на геометрическую сумму токов фазы (ТТНП). Величина тока утечки будет равняться разности токов на стороне ВН и стороне НН, с учетом потерь в трансформаторах (см. рис. 3). Также эту величину можно измерить с применением одного трансформатора тока (ДТ3), установленного на шине, соединяющей корпус силового трансформатора с заземляющим устройством, или главной заземляющей шиной подстанции. При этом должно быть обеспечено заземление корпуса трансформатора строго в одной точке.

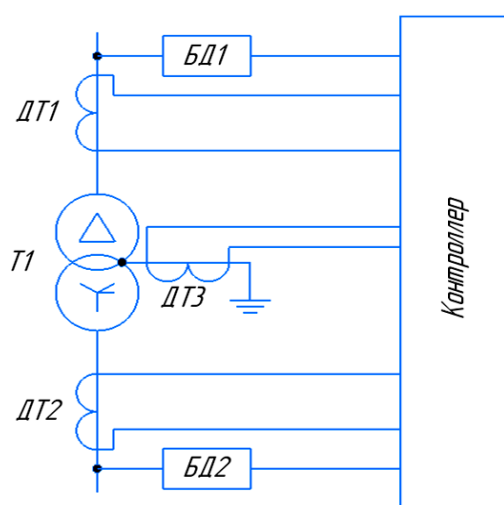


Рис. 3. Схема для отслеживания токов утечки силового трансформатора:

БД – блок делителя напряжения;

ДТ – датчик тока; Т1 – силовой трансформатор

5. Контроль шума и вибраций, возникающих в процессе работы трансформатора. Эти параметры могут свидетельствовать о наличии в нем различных внутренних повреждений. Для контроля уровня вибрации предлагается применение пьезоэлектрического датчика, укрепленного на масляном баке (или при его отсутствии на раме) трансформатора. Для контроля шума необходимо использование акустического датчика (микрофона), работающего совместно со специальным программным алгоритмом, необходимым для обработки и анализа поступающего сигнала.

В дополнение к вышеперечисленным параметрам система может контролировать параметры электроэнергии, производить регистрацию аварийных событий, контроль положения коммутационных аппаратов, видеонаблюдение и контроль несанкционированного доступа в помещение подстанции, а также измерять метеорологические параметры.

Общие требования к системе

Функционально система телеметрии, базируясь на контроле параметров состояния ПС, должна обнаруживать и распознавать развивающиеся дефекты, передавать оперативную информацию диспетчеру электросетей о текущем и прогнозируемом состоянии элементов ПС, сигнализировать о ненормальных и аварийных режимах работы оборудования.

Система может иметь трехуровневую структуру: «Датчики-контроллер-АРМ диспетчера». Дистанционная работа системы обеспечивается каналами связи. Учитывая территориальную распределенность ПС 10 (6) кВ и отсутствие проводной связи с ними, оптимальным является GSM канал связи. Также возможно применение ВОЛС, ВЧ или радиоканалов.

Заключение и выводы

По результатам анализа современных решений в области телеметрии трансформаторных подстанций 10 (6) кВ установлено, что в настоящее время ни одна из суще-

ствующих систем не способна решать задачи эффективной эксплуатации ПС.

Авторами статьи предложен оптимальный перечень контролируемых параметров, необходимых для мониторинга состояния элементов ПС.

Сформулированы общие требования к системе телеметрии и ее функциональное назначение – это способность решать задачи обнаружения и распознавания развивающихся дефектов, передача опера-

тивной информации диспетчеру электросетей о текущем и прогнозируемом состоянии элементов ПС, сигнализация о ненормальных и аварийных режимах работы оборудования.

Следующим шагом на пути создания оптимальной системы телеметрии ПС является разработка алгоритмов обработки входных сигналов с целью обнаружения и распознавания ненормальных и аварийных режимов работы ПС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СТО Газпром 2-2.3-886-2014. Оборудование электрохозяйства. Порядок проведения технического обслуживания и ремонта. Санкт-Петербург: ОАО «Газпром», 2016. 107 с.

2. Об утверждении правил технической эксплуатации электрических станций и сетей российской федерации и о внесении изменений в приказы МИНЭНЕРГО России от 13 сентября 2018 г.: Приказ Министерства Энергетики Российской Федерации от 4 октября 2022 г. № 1070 // Минюст России. 2022. Официальный интернет-портал правовой информации. Ст. 71384.

3. ГОСТ 12.2.024-1987. Система стандартов безопасности труда. Шум. Трансформаторы силовые масляные: дата введения 1989-01-01. Москва: ГК СССР по стандартам, 1989. 16 с.

4. РД 34.45-51.300-1997. Объем и нормы испытаний электрооборудования: дата введения 2004-01-01. Москва: НЦ ЭНАС, 2004. 254 с.

5. Россети Волга: сайт. URL: <https://www.rossetivolga.ru/> (дата обращения: 17.01.2024).

6. Патент № RU2779269C1 МПК G01R 31/62 (2020.01). Устройство для мониторинга силовых трансформаторов: № 2021132617: заявл. 08.11.2021: опубл. 05.09.2022 / Волчанина М.А., Горлов А.В., Еркебаев А.Ж., Кузнецов А.А. 14 с.

7. Патент № RU162784U1 МПК H02H 7/04 (2006.01). Устройство мониторинга силовых трансформаторов: № 2015123248/07: заявл. 16.06.2015: опубл. 27.06.2016 / Шерязов С.К., Пятков А.В., Митрофанов С.К. 2 с.

8. Патент № RU2403581C2 МПК G01R 31/00 (2006.01). Способ определения остаточного ресурса высоковольтного оборудования в условиях комплекса эксплуатационных воздействий: № 2008114105/28: заявл. 10.04.2008: опубл. 10.11.2010 / Вдовико В.П. 13 с.

9. Мурадалиев А.З. Об оценке показателей имитационного моделирования надежности энергооборудования // Энергетик. 2007. № 9. С. 27-28.

10. Р Газпром 2-6.2-639-2012. Оценка надежности электроснабжения объектов. Москва: ОАО «Газпром», 2014. 29 с.

Кузнецов Павел Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel A. Kuznetsov – PhD (Technical Sciences), Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Шкода Игорь Олегович – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ладин Александр Владимирович – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кузнецов Иван Георгиевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Богданова Валерия Владимировна – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor O. Shkoda – Master's student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander V. Ladin – Master's student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ivan G. Kuznetsov – Master's student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valeria V. Bogdanova – Master's student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.02.24, принята к опубликованию 14.03.24

УДК 621.315.175

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ
ПО БОРЬБЕ С ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ
НА ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

С.П. Максимов, П.А. Кузнецов, С.Ф. Степанов

**EFFICIENCY OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL MEASURES
APPLIED AGAINST ICY- RIME DEPOSITS
ON OVERHEAD POWER LINES**

S.P. Maksimov, P.A. Kuznetsov, S.F. Stepanov

В статье освещены вопросы оценки эффективности организационно-технических мероприятий (ОТМ) по борьбе с гололедно-изморозевыми отложениями (ГИО) на ВЛ. Предложен показатель и формула расчета технической эффективности ОТМ по борьбе с ГИО. Проведен анализ временных составляющих и расчет технической эффективности мероприятий по плавке ГИО на фактическом примере. Определены пути улучшения показателей технической эффективности ОТМ по борьбе с ГИО.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, плавка гололеда, организационно-технические мероприятия по борьбе с гололедно-изморозевыми отложениями, эффективность плавки гололеда

The paper highlights the issues of effectiveness of organizational and technical measures used against ice and rime deposits on overhead power lines. The authors propose an indicator and formula to estimate the technical efficiency of these measures against rime- and glaze-ice accretion. The analysis of time and technical efficiency estimates is based on actual information. The paper considers the ways to improve the indices of technical effectiveness of the measures applied for ice and rime deposits.

Keywords: overhead power line, ice and rime deposition, ice-melting, administrative and technical measures for ice-melting, efficiency of ice-melting

1. Плавка гололедно-изморозевых отложений на ВЛ и составляющие ее эффективности

Эксплуатация воздушных линий электропередачи (ВЛ) связана с повышенной аварийностью, в частности из-за подверженности гололедно-ветровым нагрузкам. В результате превышения расчетных гололедно-ветровых нагрузок, на ВЛ происходят аварии, приводящие к недоотпуску электроэнергии и затратам на восстановление ВЛ. Существуют различные мероприя-

тия по борьбе с гололедно-изморозевыми отложениями (ГИО), среди которых самым эффективным является плавка ГИО электрическим током [1].

Проведение плавки гололеда невозможно без наблюдения за ГИО: непосредственного наблюдения персоналом на месте гололедообразования, либо использования систем телеметрии гололедно-ветровых нагрузок для автоматического дистанционного мониторинга гололедно-ветровой нагрузки на ВЛ и информирования диспетчера. Наблюдение за

гололедообразованием и своевременная плавка ГИО являются двумя составляющими, определяющими успешность мероприятия по борьбе с ГИО на ВЛ [2].

Как и к любому другому процессу к мероприятию по борьбе с ГИО необходимо предъявлять требование эффективности. Эффективное мероприятие по борьбе с ГИО должно: 1) удалять гололед с проводов ВЛ за наименее возможное время для недопущения аварии; 2) затрачивать минимальное количество электроэнергии в процессе плавки для обеспечения энергоэффективности; 3) затрачивать минимальное количество денежных средств на производство операций в процессе мероприятия. Для оценки эффективности мероприятий по борьбе с ГИО авторами предлагается ввести понятия:

1) *техническая эффективность мероприятий по борьбе с ГИО* – оценка успешности проведения плавки гололеда с точки зрения времени удаления ГИО с проводов ВЛ;

2) *энергетическая эффективность мероприятия* – оценка затрат электроэнергии для плавки ГИО;

3) *технологическая эффективность мероприятия* – затраты на производство операций по проведению плавки.

В данной статье определены показатели технической эффективности плавки гололеда на ВЛ и ее составляющие.

2. Показатели и составляющие технической эффективности плавки гололедно-изморозевых отложений на ВЛ

Как описано выше, технически эффективным организационно-техническим мероприятием (ОТМ) по борьбе с ГИО является такое мероприятие, которое приводит к удалению ГИО с проводов ВЛ за минимальное время, при котором на ВЛ не может произойти авария. Данный показатель – время ОТМ по борьбе с ГИО $t_{ОТМ}$ – является основным при оценке технической эффективности мероприятия по следующим причинам:

1) при совершении операций мероприятия за минимально возможное время на проводах (тросах) ВЛ не успевает нарасти критический вес ГИО, который может привести к аварии [3];

2) при возникновении высокой ветровой нагрузки и/или начале пляски проводов (тросов) необходимо как можно быстрее произвести плавку гололеда, так как усилия на провод, арматуру и элементы опоры по сравнению с только гололедной нагрузкой возрастают в разы и повышается вероятность схлестывания проводов [4, 5];

3) изменение погодных условий с понижением температуры ухудшает нагрев провода (троса), следовательно, для успешности плавки необходимо произвести ее до изменения погодных условий в сторону похолодания [6];

4) минимально возможное время на производство мероприятия по борьбе с ГИО на одной ВЛ позволяет быстрее приступить к плавке гололеда на другой ВЛ, на которой также происходит гололедообразование.

Техническая эффективность организационно-технических мероприятий по борьбе с ГИО на ВЛ η_{tex} – показатель, который является соотношением времени проведения ОТМ по борьбе с ГИО $t_{ОТМ}$ на ВЛ к минимальной критической длительности гололедообразования $t_{кр}$, при которой возможен один или несколько следующих сценариев:

– повреждение элементов ВЛ из-за нарастания критического веса гололеда или невозможность расплавить гололед из-за нарастания слишком большой стенки гололеда;

– повреждение элементов ВЛ из-за возникновения высокой ветровой нагрузки и/или пляски провода с ГИО;

– невозможность расплавить гололед из-за понижения температуры воздуха и гололедной муфты;

– повреждение элементов и/или невозможность расплавить гололед на других ВЛ, которые находятся в очереди на плавку.

Авторы предлагают следующую формулу для определения технической эффективности мероприятий по борьбе с ГИО на ВЛ:

$$\eta_{tex} = \frac{t_{кр} - t_{ОТМ}}{t_{кр}}. \quad (1)$$

Таким образом, существует пять критических длительностей $t_{кр}$, из которых выбирается наименьшая:

- длительность нарастания критического веса гололеда $t_{кр.Р}$;
- длительность нарастания критической стенки $t_{кр.б}$;
- время до появления высокой ветровой нагрузки или пляски провода $t_{кр.ветр}$;
- время до изменения погодных условий $t_{кр.мет}$;
- время выделяемое на плавку в рамках очереди $t_{кр.очер}$.

Длительность ОТМ по борьбе с ГИО на проводах (тросах) ВЛ можно разделить по составляющим:

- 1) время обнаружения гололедообразования – от начала мероприятия по наблюдению до обнаружения гололеда – $t_{обн}$;
- 2) время ожидания согласования на проведение плавки гололеда – $t_{ожид}$;
- 3) время на сборку схемы плавки гололеда – $t_{сбор}$;
- 4) время на плавку гололеда – $t_{пл}$.

Для технически эффективного мероприятия по борьбе с ВЛ необходимо минимально сократить время на каждом из этих этапов. Так, своевременно обнаруженные отложения позволяют раньше приступить к сборке схемы плавки гололеда, а применение способа плавки, требующего минимальные изменения схемы сети, позволяет раньше приступить к самой плавке гололеда. Сокращение времени производства этих двух этапов приводит к тому, что за данное время на проводе (тросе) гололедная муфта не успеет набрать большую толщину, либо не успеет начаться пляска провода. Следовательно, и время плавки такой муфты ГИО также будет меньше.

Далее разложим данные составляющие по операциям и определим время их производства для расчета технической эффективности мероприятия по борьбе с ГИО на ВЛ.

3. Определение времени, требуемого для плавки ГИО на ВЛ

Согласно составляющим любого мероприятия по плавке гололеда, описанным выше, время удаления ГИО с проводов описывается следующим выражением:

$$t_{ОТМ} = t_{обн} + t_{ожид} + t_{сбор} + t_{пл}. \quad (2)$$

Рассмотрим каждые составляющие в отдельности.

Обнаружение гололедообразования может производиться двумя способами:

1) с помощью систем телеметрии гололедно-ветровых нагрузок, производящих обнаружение ГИО и сигнализацию о превышении нагрузки в автоматическом режиме;

2) выездом персонала на место вероятного появления ГИО для визуального наблюдения.

Ключевое различие в этих двух способах заключается в организации мониторинга гололедообразования:

– в первом случае мониторинг и сигнализация производятся автоматически;

– во втором случае происходит последовательный объезд контрольных точек для визуального наблюдения дежурной бригадой ОВБ, при этом периодичность осмотра намного больше чем в случае мониторинга.

Следовательно, время обнаружения гололедообразования:

$$t_{обн} = \begin{cases} T_{опр}; & (\text{с СТГН}) \\ T_{объезда}; & (\text{без СТГН}) \end{cases}, \quad (3)$$

где $T_{опр}$ – время опроса системы СТГН;

$T_{объезда}$ – периодичность объезда контрольных точек осмотра ВЛ.

Время ожидания согласования на проведение плавки гололеда $t_{ожид}$ – это время от обнаружения опасной величины гололедно-ветровой нагрузки и сообщения диспетчера о необходимости проведения плавки гололеда до принятия распоряжения о плавке. Данная величина напрямую зависит от принадлежности ВЛ к определенному диспетчерскому управлению и от потребителя, а также от очередности плавки гололеда на разных ВЛ. Так, например, ответственные ВЛ 110 кВ находятся в ведении, а ВЛ 220 кВ и выше находятся под диспетчерским управлением РДУ АО «Системный оператор Единой энергетической системы», и вывод данных линий из работы для проведения плавки гололеда связан

с режимом сети и запасом по пропускной способности других ЛЭП и оборудования. Так же по ВЛ может осуществляться электроснабжение потребителя, который в данный момент не может ввести резервы или прервать процесс производства. В связи с этим величина $t_{ожид}$ может достигать нескольких часов. В случае же нахождения ВЛ в полном ведомстве и распоряжении ЦУС электросетевой организации возможно в оптимально короткие сроки организовать сборку схемы плавки гололеда. Как правило, это касается ВЛ-10(6) кВ и ВЛ-35 кВ. В этом случае, встает вопрос очередности, так как проплавить гололед на всех ВЛ сразу невозможно.

Время сборки схемы плавки гололеда $t_{сбор}$ складывается из следующих слагаемых:

1) время на совершение операций переключений на подстанции (подстанциях) $t_{он.ПС}$;

2) время на совершение операций переключения на отпайках ВЛ $t_{он.omn}$:

$$t_{сбор} = t_{он.ПС} + t_{он.omn}. \quad (4)$$

Время $t_{он.ПС}$ зависит от того, есть ли на ней дежурный персонал и от количества требуемых для сборки схемы переключений. Время $t_{он.omn}$ зависит от расположения коммутационных аппаратов отпайки (в начале или конце отпайки) и времени на совершение переключений. Таким образом:

$$t_{он.ПС} = t_{езд.ПС1-2} + t_{пер.ПС1} + t_{пер.ПС2}, \quad (5)$$

где $t_{езд.ПС1-2}$ – время поездки оперативно-выездных бригад (ОВБ) на подстанции ПС1 и ПС2;

$t_{пер.ПС1}$, $t_{пер.ПС2}$ – время последовательных переключений на подстанциях согласно технологической карте.

$$t_{он.omn} = \sum_{i=1}^n (t_{i.езд.omn} + t_{i.пер.omn}), \quad (6)$$

где $t_{i.езд.omn}$ – время поездки ОВБ до i -й отпайки;

$t_{i.пер.omn}$ – время переключений коммутационных аппаратов на i -й отпайке согласно технологической карте;

n – количество отпайки на ВЛ.

Для цифровых подстанций, оснащенных современными системами автоматизации

и телемеханики, дистанционным управлением коммутационными аппаратами возможно достичь снижения $t_{сбор}$ до минимальных значений.

Время плавки гололеда $t_{пл}$ зависит от многих величин. Переменными метеорологическими параметрами, влияющими на длительность плавки гололедной муфты, являются:

- $\vartheta_{\text{в}}$ – температура воздуха;
- v – скорость ветра;
- $\varphi_{\text{в}}$ – угол между направлением ветра и осью провода;
- l_c – длина гололедной муфты;
- ρ_c – плотность гололеда;
- b – толщина стенки гололеда;
- D – диаметр гололедной муфты;
- $k_{нс}$ – коэффициент несимметрии гололедной муфты.

При этом очевидно, что такой параметр как толщина стенки b гололедной муфты на момент начала ее плавки является функцией времени от начала гололедообразования до начала плавки и скорости гололедообразования, а именно – скорости нарастания стенки гололеда b' . Чем больше времени проходит с начала гололедообразования и чем больше скорость b' , тем больше стенка гололедной муфты и ее вес к началу плавки. Обозначим время от начала гололедообразования до начала плавки временем на предварительную подготовку к плавке:

$$t_{пред} = t_{обн} + t_{ожид} + t_{сбор}. \quad (7)$$

Тогда толщина стенки муфты равна:

$$b = b' \cdot t_{пред}. \quad (8)$$

Таким образом, время плавки является функцией времени предварительной подготовки к плавке $t_{пл} = f(t_{пред})$, и чем больше времени длится подготовка, тем больше времени займет плавка. В конечном итоге, если предварительная подготовка длится слишком долго, расчетное время плавки может приближаться к бесконечности, то есть плавка будет неуспешной.

4. Определение критического времени, требуемого для плавки ГИО на ВЛ

Согласно вышеописанному понятию критической длительности $t_{кр}$ представляется следующей формулой:

$$t_{кр} = \min(t_{кр.P}, t_{кр.b}, t_{кр.ветр}, t_{кр.мет}, t_{кр.очер}). \quad (9)$$

Рассмотрим каждые составляющие в отдельности.

Длительность нарастания критической стенки $t_{кр.b}$ или веса гололеда $t_{кр.P}$ зависит от скорости нарастания стенки гололеда b' и соответствующей ей скорости нарастания веса p' следующим образом:

$$t_{кр.b} = \frac{b_{кр}}{b'}; \quad (10)$$

$$t_{кр.P} = \frac{P_{кр}}{p'}. \quad (11)$$

Соответственно критическая стенка гололеда $b_{кр}$ и критический вес $P_{кр}$ будут нарастать с разной скоростью во времени. Примем, что скорость нарастания стенки гололеда b' неизменна. При идеальной круглой гололедной муфте с учетом (8) вес ГИО P :

$$P = \rho_z l_z S g = \pi \rho_z l_z g (d_{np} b' t_{npед} + b'^2 t_{npед}^2), \quad (12)$$

где d_{np} – диаметр провода.

Скорость увеличения веса p' является производной P по времени:

$$p' = \pi \rho_z l_z g (d_{np} b' + 2 \cdot b'^2 t_{npед}). \quad (13)$$

Согласно формуле (13) скорость увеличения веса p' в промежуточном пролете ВЛ линейно зависит от времени предварительной подготовки к плавке $t_{npед}$ и находится в квадратичной зависимости от скорости нарастания стенки b' . Таким образом, принятие решения о плавке гололеда должно учитывать не только фактический вес гололеда, но и интенсивность его роста, в том числе и нелинейность роста веса гололеда.

Время до появления высокой ветровой нагрузки или пляски провода $t_{кр.ветр}$ неопределенно, так как сильно изменяется во времени и слабо поддается прогнозу. Это происходит потому, что скорость и направление ветра сильно зависят от местности, где проходит линия электропередачи. При этом порывы ветра могут как усиливаться, так и ослабляться относительно метеопрогноза. В

то же время воздействие ветровой нагрузки на провод с ГИО быстро нарастает, часто совпадает с увеличением скорости отложения гололеда и требует немедленной команды на плавку гололеда. При оценке $t_{кр.ветр}$ можно опираться только на прогноз погоды, прогноз движения циклонов, показания метеопостов местных постов контроля СТГН и опыт сотрудников служб воздушных линий электропередачи и диспетчерской службы с учетом рельефа местности.

Время до изменения погодных условий $t_{кр.мет}$ лучше поддается определению по прогнозу погоды, так как распределение температуры в районе менее зависит от рельефа, чем скорость и направление ветра. Изменение погодных условий может происходить в сторону как снижения температуры, то есть ухудшения условий плавки гололеда, так и ее увеличения.

Время, выделяемое на плавку в рамках очереди $t_{кр.очер}$, должно учитывать все три вышеперечисленных ограничения в комплексе для каждой ВЛ, на которой необходимо произвести плавку гололеда с учетом количества линий и их удаленности. Так, чем больше ВЛ находится в эксплуатации сетевой организации и чем интенсивнее растут гололедно-изморозевые отложения и выше ветровая нагрузка, тем меньше времени отводится на одну плавку.

Результаты анализа данных ограничений на длительность подготовки и плавки гололеда говорят о том, что определение очередности плавки гололеда является нетривиальной задачей, при решении которой нехватка информации может привести к неправильной очередности плавки и последующей аварии.

5. Оценка технической эффективности мероприятий по плавке ГИО

Произведем оценку технической эффективности плавки гололеда на примере следующей аварийно-опасной ситуации: возникновение ГИО в результате ледяного дождя 03-05.03.2022 года ПАО «Россети Волга» – Саратовские РС.

С 3 по 5 марта в Саратовском, Энгельском и Красноармейском районах

Саратовской области проходили интенсивные осадки в виде ледяного дождя. Данные метеорологические условия привели к гололедообразованию на проводах ВЛ и контактной сети, в частности было прекращено движение троллейбусов между г. Саратовом и г. Энгельсом [7]. Гололедообразование было отмечено на всех линиях электропередачи, оборудованных постами контроля гололедно-ветровой нагрузки СТГН, наибольшая гололедная нагрузка отмечена на ВЛ 110 кВ

Распределительная – Красноармейск, отпайка ПС 110 кВ Паницкая, пролет опоры № 9, график приведен на рис. 1. Видно, что гололедообразование происходило в 2 этапа: 1) медленное нарастание стенки гололеда со средней скоростью $b' = 0,03$ см/ч при низкой интенсивности ледяного дождя, 2) быстрое нарастание гололеда со средней скоростью $b' = 0,067$ см/ч с максимальным значением $b'_{\max} = 0,484$ см/ч при высокой интенсивности ледяного дождя.

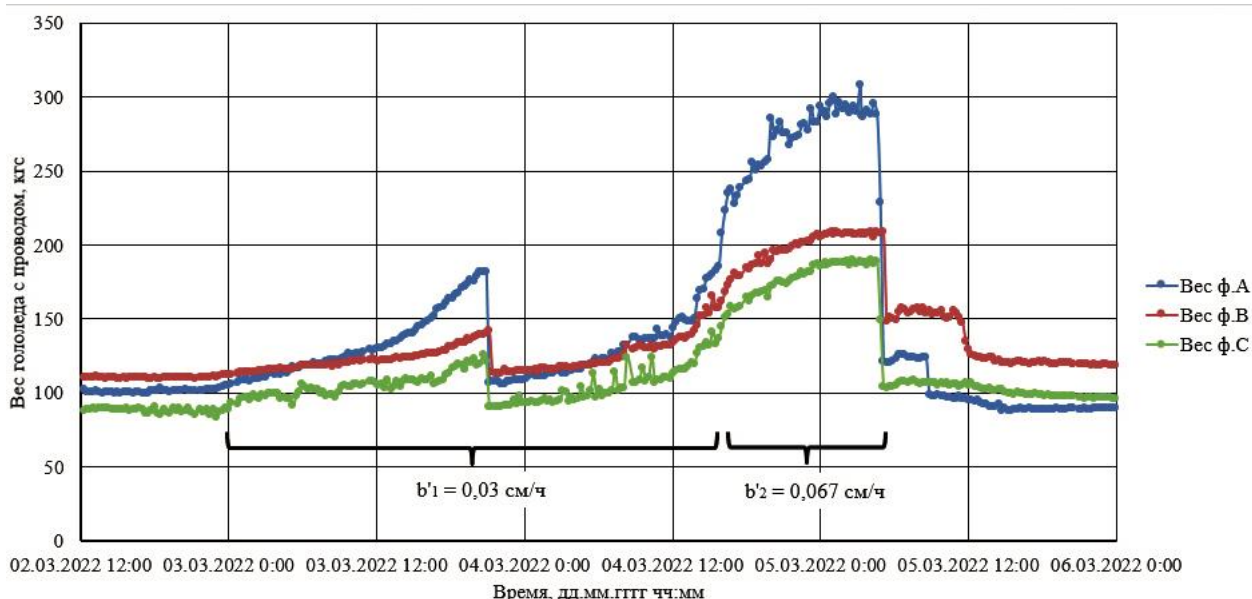


Рис. 1. График гололедной нагрузки на ВЛ 110 кВ Распределительная – Красноармейск, отпайка ПС 110 кВ Паницкая, пролет опоры № 9

Произведем аналитический расчет критического времени плавки гололеда для данной ситуации, а также минимального и максимально возможного времени предварительной подготовки к плавке гололеда и эффективности плавки на примере ВЛ 110 кВ Распределительная – Красноармейск I цепь, отпайка ПС 110 кВ Паницкая.

Пример расчета:

Исходные данные:

- марка провода: АС-120/19;
- ток плавки $I_{пл} = 806$ А;
- средняя скорость нарастания стенки гололеда:

– $b'_1 = 0,03$ см/ч с 00:00 ч 03.03.2022 г. по 15:43 04.03.2022 г.;

– $b'_2 = 0,067$ см/ч. с 15:43 04.03.2022 г. по 12:00 05.03.2022 г.

1) Определим критическое время гололедообразования. Для этого произведем оценку всех составляющих критического времени гололедообразования:

– $t_{кр.б}$: для предельной стенки гололеда для тока плавки данной ВЛ $b_{кр} = 6,5$ см при указанной b'_1 $t_{кр.б1} = 216$ ч. До усиления ледяного дождя прошло около 40 ч и 1 плавка гололеда. На момент усиления стенка гололеда $b = 0,66$ см. Тогда по формуле (10) $t_{кр.б2} = 87$ ч.;

– $t_{кр.р}$: для предельного веса гололеда по условиям механической прочности данной ВЛ $P_{кр} = 1840$ кгс. При указанной b'_1 , решение квадратного уравнения (12) дает $t_{кр.р} = 171$ ч. На момент усиления ледяного дождя вес муфты гололеда $P = 77$ кгс. Тогда при скорости нарастания

стенки b'_2 , решая уравнения (12), $t_{кр.р2} = 73,5$ ч.;

– $t_{кр.ветр}$: гололедообразование началось 03.03.2022 г. в 00:00. Архив ближайшей метеостанции «Октябрьский Городок» (см. таблицу [8]) показывает приближение метели с порывами ветра до 15 м/с в 00:00 часов 06.03.2022 г. Примем критическое время $t_{кр.ветр} \approx 63$ ч;

– $t_{кр.мет}$: Архив ближайшей метеостанции «Октябрьский Городок» показывает снижение температуры воздуха до -5°C к 04:00 часам 06.05.2022 г., а затем и до $-$

10°C к 04:00 часам 07.05.2022 г. Примем критическое время $t_{кр.мет} \approx 63$ ч;

– $t_{кр.очер}$: в юго-восточной части городского округа г. Саратов с учетом рассматриваемой ВЛ во время гололедообразования плавке подлежит 19 ВЛ 35-110 кВ с учетом отпаек. Поскольку ледяной дождь был по всей близлежащей площади Саратова, примем, что на всех этих линиях требуется провести плавку гололеда. Выберем минимальную из рассчитанных выше длительностей $t_{кр.ветр} \approx 63$ ч, тогда $t_{кр.очер} = 63/19 = 3$ ч 18 мин.

Обобщенные данные метеостанции «Октябрьский городок» с 03.03.2022 г. по 06.03.2022 г.

Дата	Температура воздуха, $^\circ\text{C}$	Скорость ветра, м/с	Направление ветра	Текущая погода
03.03.2022 г.	$-4,6 \dots -2,9$	$2 \dots 4$	В	Туман, ледяной туман
04.03.2022 г.	$-2,4 \dots -1,2$	$2 \dots 6$	В	Туман, с отложением изморози, слабый заморающий дождь, диаметр ГИО на станции – 7 мм
05.03.2022 г.	$-2,2 \dots +0,2$	$1 \dots 9$	Преимущ. С	Снег, умеренный поземок
06.03.2022 г.	$-9,0 \dots -3,2$	$3 \dots 12$	Преимущ. С-З	Ясная погода

Примем критическую длительность гололедообразования $t_{кр} = 3$ ч 18 мин. Эта длительность должна включать сбор данных о текущем гололедообразовании, выезды на ПС для переключений и плавку гололеда.

2) Определим время, затрачиваемое на мероприятия по плавке гололеда:

– минимальное время обнаружения $t_{обн}$ возможно при установке на ВЛ поста контроля СТГН. Рекомендуемый производителем период опроса поста – 1 раз в 20 мин. Максимальное время обнаружения складывается из длительности объезда контрольных точек дежурной оперативно-выездной бригадой (ОВБ). Длительность объезда всех контрольных точек для осмотра 19 ВЛ 35-110 кВ в юго-восточной части городского округа г. Саратова оценивается длительностью около 140 мин. Далее после объезда перед ОВБ встает задача контроля плавки гололеда, которая выполняется одновременно с проведением переключений на ПС – время ожидания

согласования на проведение плавки гололеда зависит от времени на составление перечня ВЛ, подлежащих плавке, а также от времени очереди данной ВЛ на плавку. Минимальное время ожидания для ВЛ, которая подлежит немедленной плавке, – 10 мин.;

– после принятия решения о необходимости плавки гололеда на необслуживаемую ПС 110 кВ Паницкая выезжает бригада ОВБ для установки короткого замыкания, а также на ПС 110 кВ Красноармейск, ПС 110 кВ Сельмаш для отключения ВЛ от распределительного устройства. Время поездки на ПС из г. Саратова и г. Красноармейска до подстанций с учетом сборов оценивается длительностью около 60 мин. Время на переключения на ПС оценивается длительностью около 30 мин. Таким образом минимальное время предварительной подготовки к плавке на ВЛ 110 кВ $t_{пред.мин} = 2$ ч, а максимальное $t_{пред.мах} = 3$ ч 30 мин;

– время плавки гололедно-изморозевых отложений будет зависеть от

выбранного тока плавки, погодных условий (температуры воздуха, скорости и направления ветра) и толщины гололедной муфты, которая выросла за время обнаружения и подготовки $t_{пред}$. Примем за расчетные погодные условия во время наблюдений: температуру воздуха $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветра 3 м/с и направление 90° к оси визирования ВЛ. Ток плавки для ВЛ 110 кВ $I_{пл} = 806\text{ А}$. Вес гололеда на фазе А составлял 189 кг , что соответствует стенке кристаллического гололеда толщиной $1,26\text{ см}$. В соответствии с методикой [6] время плавки гололеда составляет 8 мин , плавка успешна.

Итоговое время удаления гололеда на ВЛ: при наличии СТГН – $2\text{ ч } 8\text{ мин}$, без СТГН – $3\text{ ч } 38\text{ мин}$.

Таким образом, расчетная техническая эффективность ОТМ по борьбе с ГИО на ВЛ 110 кВ Распределительная – Красноармейск, отпайка ПС 110 кВ Паницкая составляет: $\eta_{mex.max} = \frac{3,3 - 2,13}{3,3} = 0,35$. Как

видно на графике (рис. 1), плавка на ВЛ проведена успешно, что подтверждается положительным значением $\eta_{mex.max}$.

Для более точного расчета технической эффективности требуется дополнительная информация от электросетевой организации, а именно:

- организация переездов ОВБ между необслуживаемыми подстанциями с целью плавки одной или подряд нескольких ВЛ, отходящих от данной подстанции;
- организация переездов ОВБ для наблюдения за гололедом после его обнаружения и при плавке;
- схемные ограничения при плавке нескольких ВЛ одновременно;
- необходимость проведения повторных плавок гололеда.

5. Заключение

В результате проведенной работы получены следующие результаты:

1. Поднят вопрос необходимости оценки эффективности плавки гололедно-изморозевых отложений. Введены поня-

тия технической, энергетической и технологической эффективности организационно-технических мероприятий по борьбе с ГИО.

2. Предложен показатель технической эффективности η_{mex} , определяющий уровень успешности организационно-технических мероприятий по борьбе с ГИО, и формула для его определения. Положительные значения η_{mex} свидетельствуют об успешности ОТМ по борьбе с ГИО. Отрицательные значения η_{mex} свидетельствуют о неэффективности мероприятий и наличии рисков гололедно-ветровых аварий на ВЛ. Чем ближе значение η_{mex} к 1 , тем выше эффективность принятых мероприятий.

3. Выделены временные составляющие технической эффективности: а) критические длительности $t_{кр}$ процесса нарастания гололедных отложений и влияния метеоусловий на процесс плавки гололеда; б) временной интервал от момента обнаружения ГИО до окончания плавки гололеда – длительность организационно-технических мероприятий (ОТМ) по плавке ГИО $t_{ОТМ}$.

4. Приведен пример расчетно-аналитической оценки технических эффективности на примере плавки гололеда на ВЛ 110 кВ Саратовской энергосистемы. Успешная плавка подтверждена положительным показателем эффективности ($\eta_{mex} = 0,35 > 0$).

5. Улучшение показателей технической эффективности достигается сокращением времени $t_{ОТМ}$ путем внедрения систем СТГН, АСУ ТП, телемеханики, цифровых подстанций, а также перспективного развития систем адаптивной управляемой автоматизированной плавки гололеда без отключения потребителей.

6. Приведенный в данной статье расчет является основой для разработки методики оценки технической эффективности организационно-технических мероприятий по борьбе с ГИО для практического применения в электросетевых организациях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Максимов С.П., Кузнецов П.А.** Анализ существующих методов плавки гололедно-изморозевых отложений на проводах ВЛ-10(6) кВ // Вопросы электротехнологии. 2023. № 1 (38). С. 47-56.
2. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях: монография / В.Я. Башкевич, Г.Г. Угаров, П.А. Кузнецов, С.Б. Стебеньков. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2013. 244 с.
3. **Бургсдорф В.В.** Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно гололедных районах. Москва: Госэнергоиздат, 1947. 196 с.
4. **Яковлев Л.В.** Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи и способы борьбы с нею. Москва: Энергетик: Энергопрогресс, 2002 (Тип. изд-ва «Фолиум»). 95 с.
5. **Кузнецов П.А., Максимов С.П.** Мониторинг экстремальных ветровых воздействий на воздушные линии электропередачи // Вопросы электротехнологии. 2021. № 2 (31). С. 21-33.
6. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: учеб. пособие / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, Е. И. Сацук. Москва: Изд. дом МЭИ, 2007. 448 с.
7. Из-за обледеневших проводов полностью прервано троллейбусное сообщение между Саратовом и Энгельсом // Официальный сайт ИА «Версия-Саратов». URL: <https://nversia.ru/news/iz-za-obledenevshih-provodov-polnostyu-prervano-trolleybusnoe-soobschenie-mezhdu-saratovom-i-engelsom/> (дата обращения 17.02.2024 г.).
8. Архив погоды в Октябрьском Городке // Официальный сайт ООО «Расписание Погоды». URL: <https://rp5.ruB5> (дата обращения 17.02.2024 г.).

Максимов Сергей Петрович – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., инженер-проектировщик ООО «НТЦ Инструмент-микро»

Кузнецов Павел Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., технический директор ООО «НТЦ Инструмент-микро»

Степанов Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey P. Maksimov – Postgraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Project Engineer of ООО NTC Instrument-Micro

Pavel A. Kuznetsov – PhD (Technical Sciences), Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Technical Director at ООО NTC Instrument-Micro

Sergey S. Stepanov – Dr. Sci. Tech., Department of Power Engineering and Electrical Engineering,, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.02.24, принята к опубликованию 14.03.24

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО БОЛЬШОЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЕ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

И.Ф. Байбиков, А.В. Стариков

SYNTHESIS OF THE POSITION CONTROLLER PROVIDING HIGH SPEED OPERATION OF THE SERVO DRIVE WITH A SYNCHRONOUS SERVO MOTOR

I.F. Baybikov A.V. Starikov

В статье рассматривается следящий электропривод с синхронным исполнительным двигателем и векторным управлением. Для повышения быстродействия следящего электропривода при отработке управляющих воздействий предложено использовать нестандартные структурное построение и регулятор положения. Произведен параметрический синтез и получены формулы для адекватного расчета параметров регулятора положения. Для обеспечения технической реализуемости произведено упрощение регулятора посредством снижения порядка его передаточной функции. Методом компьютерного моделирования доказано высокое быстродействие предлагаемого электропривода.

Ключевые слова: *следящий электропривод, синхронный двигатель, регулятор положения, векторное управление*

The paper discusses a servo electric drive with a synchronous motor and vector control. To increase the speed response of the servo electric drive when executing monitoring, it is proposed to use a non-standard structural design and position controller. A parametric synthesis was carried out and formula were obtained for adequate calculation of the position controller parameters. To ensure technical feasibility, the controller was simplified by reducing the order of its transfer function. A high-speed response of the proposed electric drive has been proved using computer modeling.

Keywords: *servo electric drive, synchronous motor, position controller, vector control*

Введение

В прецизионном металлообрабатывающем оборудовании и промышленных роботах находят применение следящие электроприводы с синхронными исполнительными двигателями. При этом следует отметить, что большинство таких электроприводов построены по принципам векторного управления с подчиненным регулированием координат [1, 2]. Однако следящие системы векторного управления при стандартных типах и

настройках регуляторов обладают низким быстродействием, которое можно охарактеризовать временем переходного процесса $1 \div 3$ с или полосой пропускания частот контура положения порядка 5 Гц [2-4].

Целью проводимого исследования является повышение быстродействия следящих электроприводов с векторным управлением синхронным исполнительным двигателем за счет применения нестандартных регуляторов.

Решение задачи

Для достижения поставленной цели рассмотрим следующую систему векторного управления с синхронным двигателем с постоянными магнитами на роторе, содержащую контуры регулирования проекций вектора тока статора I_{1d} и I_{1q} и контур положения (рис. 1). На структурной схеме приняты обозначения: $k_{\partial n}$ – коэффициент передачи датчика положения; k_{ocm} – коэффициент передачи обратной связи по току; $W_{pn}(p)$ и $W_{pm}(p)$ – передаточные функции регуляторов положения и тока соответственно; k_{cn}

и T_{cn} – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя; R_1 , L_1 и T_1 – активное сопротивление, индуктивность и постоянная времени фазы статорной обмотки синхронного двигателя; Z_n и J_{np} – число пар полюсов и приведенный момент инерции ротора; k_{um} – коэффициент передачи исполнительного механизма; ψ_p и ψ_d – потокосцепление ротора и проекция результирующего потокосцепления машины на ось d вращающейся вместе с ротором системы координат $0dq$.

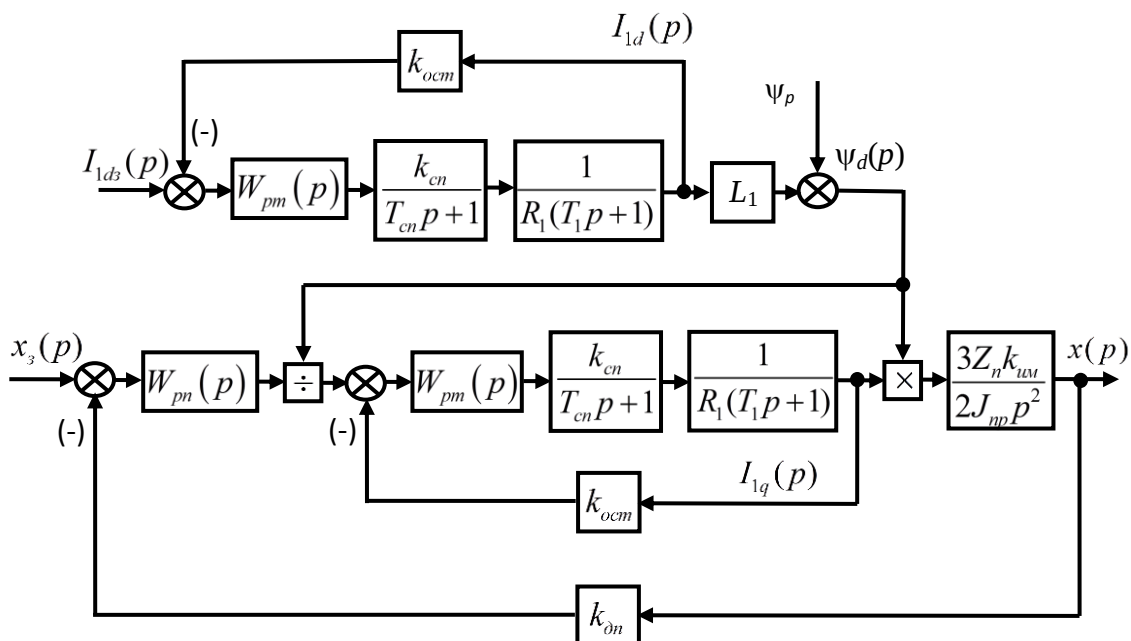


Рис. 1. Структурная схема предлагаемого следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем

При этом будем полагать, что в рассматриваемом следящем электроприводе известными методами [5] производится расчет проекций тока статора I_{1d} и I_{1q} по значениям фазных токов статора и углового положения ротора, измеренным соответствующими датчиками. Кроме того, как и принято в системах векторного управления, в контурах тока производится компенсация перекрестных связей, вызванных действием электродвижущей силы. При скоростях вращения синхронного двигателя ниже номинальной заданное значение проекции I_{1d} принимается равным нулю, и контур стабилизации этой составляющей

поддерживает ее с высокой степенью точности на требуемом уровне. С учетом этого можно представить упрощенную структурную схему следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем следующим образом (рис. 2).

Передаточная функция регулятора тока выбирается традиционными методами [6]. Тогда при настройке контура тока на технический оптимум выбирается пропорционально-интегральный регулятор с передаточной функцией

$$W_{pm}(p) = \frac{R_1(T_1p + 1)}{2T_{\mu 1}k_{cn}k_{ocm}p},$$

где $T_{\mu 1}$ – малая некомпенсируемая постоянная времени (как правило, постоянная вре-

мени силового преобразователя); p – комплексная переменная.

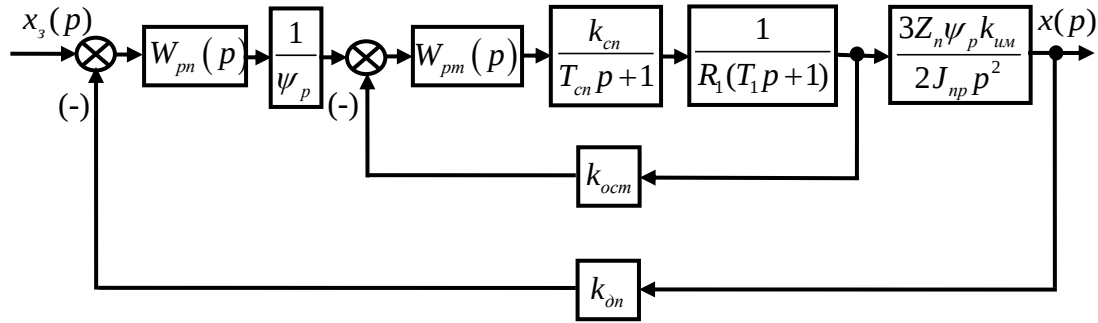


Рис. 2. Упрощенная структурная схема рассматриваемого следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем

Но применяют также пропорциональный регулятор тока с коэффициентом передачи k_{pm} , величина которого выбирается исходя из требуемого времени переходного процесса в контуре тока [7]. Рассмотрим именно этот случай, когда $W_{pm}(p) = k_{pm}$. Тогда передаточная функция замкнутого контура тока будет равна

$$W_{zm}(p) = \frac{k_{zm}}{a_0 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (1)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{L_1 T_{cn}}{R_1 + k_{pm} k_{cn} k_{осм}}; \quad a_1 = \frac{R_1 (T_{cn} + T_1)}{R_1 + k_{pm} k_{cn} k_{осм}};$$

$$k_{zm} = \frac{k_{pm} k_{cn}}{(R_1 + k_{pm} k_{cn} k_{осм})}.$$

Если предположить, что величина потокосцепления ψ_d ротора установилась на требуемом уровне за счет контура регулирования проекции тока статора I_{1d} , то передаточная функция замкнутого контура положения в рассматриваемом следящем электроприводе будет выглядеть следующим образом:

$$W_{zn}(p) = \frac{x(p)}{x_3(p)} =$$

$$= \frac{3Z_n k_{ум} W_{пн}(p) W_{zm}(p)}{2J_{нп} p^2 \left[1 + \frac{3Z_n k_{ум} k_{он} W_{пн}(p) W_{zm}(p)}{2J_{нп} p^2} \right]}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получим

$$W_{zn}(p) = \frac{W_{пн}(p)}{k_{он} [A(p) + W_{пн}(p)]}, \quad (3)$$

где

$$A(p) = \frac{2J_{нп} a_0}{3Z_n k_{zm} k_{ум} k_{он}} p^4 + \frac{2J_{нп} a_1}{3Z_n k_{zm} k_{ум} k_{он}} p^3 +$$

$$+ \frac{2J_{нп}}{3Z_n k_{zm} k_{ум} k_{он}} p^2$$

Для выбора передаточной функции регулятора положения $W_{пн}(p)$, обеспечивающего большое быстродействие, потребуем, чтобы передаточная замкнутого следящего электропривода имела вид

$$W_{zn}(p) = \frac{b_{01} p + 1}{k_{он} \left[\frac{a_{01} p^5 + a_{11} p^4 + a_{21} p^3 +}{+ a_{31} p^2 + a_{41} p + 1} \right]}. \quad (4)$$

Такое требование обусловлено тем, что, например, при численных значениях коэффициентов $b_{01} = 0,101$ с, $a_{01} = 2,407 \cdot 10^{-11}$ с⁵, $a_{11} = 1,74 \cdot 10^{-8}$ с⁴, $a_{21} = 5,863 \cdot 10^{-6}$ с³, $a_{31} = 1,49 \cdot 10^{-3}$ с², $a_{41} = 0,114$ с $k_{он} = 1$ передаточная функция (4) обеспечивает переходный процесс, график которого показан на рис. 3.

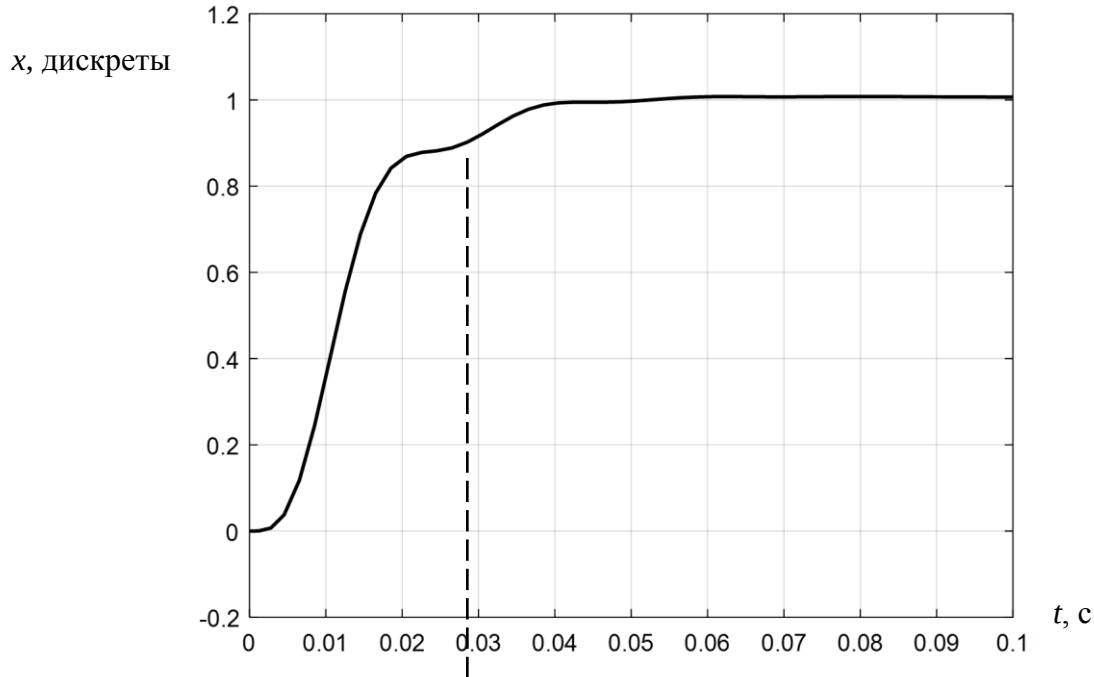


Рис. 3. График переходного процесса, построенный по передаточной функции (4) при выбранных численных значениях коэффициентов

Анализ графика показывает, что время переходного процесса составляет 0,037 с, то есть наблюдается высокое быстродействие следящего электропривода при отработке управляющих воздействий. Следовательно, приравнивая правые части формул (3) и (4), можно найти передаточную функцию $W_{pn}(p)$ регулятора положения, обеспечивающего точно такой же переходный процесс:

$$\frac{W_{pn}(p)}{A(p) + W_{pn}(p)} = \frac{b_{01}p + 1}{a_{01}p^5 + a_{11}p^4 + a_{21}p^3 + a_{31}p^2 + a_{41}p + 1} \quad (5)$$

Производя в (5) необходимые алгебраические преобразования, в результате получим искомую передаточную функцию регулятора положения:

$$W_{pn}(p) = \frac{N_{pn}(p)}{\varepsilon_{pn}(p)} = \frac{b_{02}p^4 + b_{12}p^3 + b_{22}p^2 + b_{32}p}{a_{02}p^4 + a_{12}p^3 + a_{22}p^2 + a_{32}p + 1} \quad (6)$$

где

$$b_{02} = \frac{2J_{np}a_0b_{01}}{3Z_nk_{zm}k_{um}k_{dn}(a_{41} - b_{01})};$$

$$b_{12} = \frac{2J_{np}(a_0 + a_1b_{01})}{3Z_nk_{zm}k_{um}k_{dn}(a_{41} - b_{01})};$$

$$b_{22} = \frac{2J_{np}(a_1 + b_{01})}{3Z_nk_{zm}k_{um}k_{dn}(a_{41} - b_{01})};$$

$$b_{32} = \frac{2J_{np}}{3Z_nk_{zm}k_{um}k_{dn}(a_{41} - b_{01})}; \quad a_{02} = \frac{a_{01}}{a_{41} - b_{01}};$$

$$a_{12} = \frac{a_{11}}{a_{41} - b_{01}}; \quad a_{22} = \frac{a_{21}}{a_{41} - b_{01}}; \quad a_{32} = \frac{a_{31}}{a_{41} - b_{01}};$$

$\varepsilon_{pn} = x_z - k_{dn}x$; N_{pn} – выходной сигнал регулятора положения.

Рассчитаем передаточную функцию (6) для следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем 1FK7060-5AF71, замкнутого по датчику положения ротора с разрешающей способностью 2048 импульсов на оборот. При этом при расчетах примем $R_1 = 1,44$ Ом, $L_1 = 0,0147$ Гн, $T_1 = 0,01$ с, $Z_n = 4$ и $J_{np} = 1,778 \cdot 10^{-3}$ кгм², $\psi_p = 0,212$ Вс, $k_{cn} = 1$, $T_{cn} = 0,0016$ с, $k_{ocm} = 1$, $k_{um} = 326$ дискрет/рад, $k_{dn} = 1$, $k_{pm} = 8$ В/А. С учетом этих данных требуемая передаточная функция регулятора положения принимает следующие численные значения:

$$W_{pn}(p) = \frac{2,111 \cdot 10^{-11} p^4 + 1,547 \cdot 10^{-8} p^3 + 8,626 \cdot 10^{-6} p^2 + 8,382 \cdot 10^{-5} p}{1,881 \cdot 10^{-9} p^4 + 1,36 \cdot 10^{-6} p^3 + 4,58 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,116 p + 1} \quad (7)$$

Расчетная модель предлагаемого следящего электропривода при выбранном типе и параметрах регулятора положения

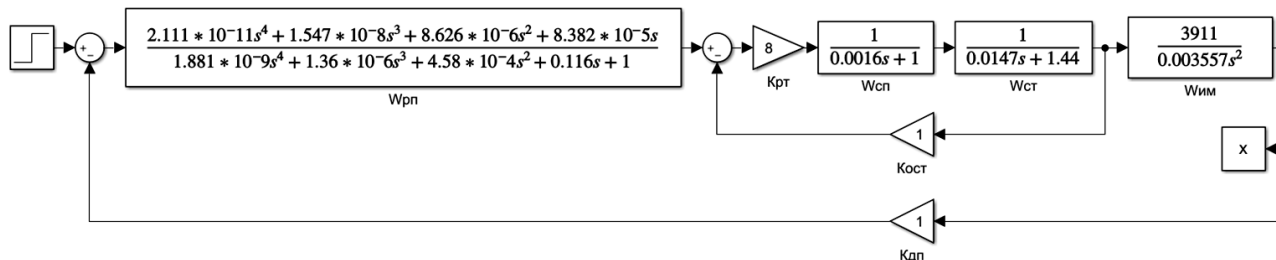


Рис. 4. Расчетная модель предлагаемого следящего электропривода

Однако анализ передаточной функции (6) показывает, что для технической реализации полученного в процессе синтеза регулятора положения необходимо вычислять производные первого, второго, третьего и четвертого порядков от выходного сигнала регулятора и рассогласования на его входе. В системах управления, как правило, используют в регуляторах производные не выше второго порядка [8, 9]. Поэтому отбросим в передаточных функциях (6) и (7) члены со степенями p выше второго порядка. Тогда передаточная функция упрощенного регулятора положения будет иметь следующий вид:

$$W_{pn}(p) = \frac{N_{pn}(p)}{\varepsilon_{pn}(p)} = \frac{b_{03}p^2 + b_{13}p}{a_{03}p^2 + a_{13}p + 1}, \quad (8)$$

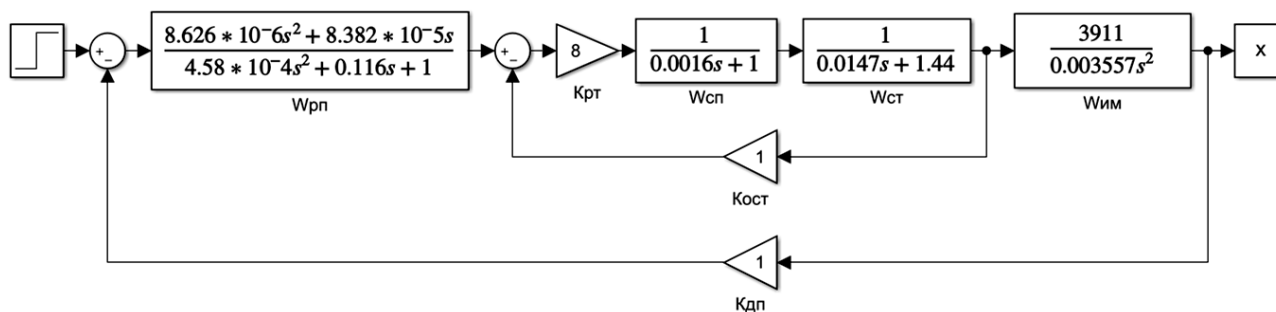


Рис. 5. Расчетная модель предлагаемого следящего электропривода с упрощенным регулятором положения

(рис. 4) позволяет построить график переходного процесса по управляющему воздействию, который полностью совпадает с графиком, приведенным на рис. 3.

Это подтверждает правильность выбора типа и параметров регулятора положения, определяемых формулами (6) и (7), а также высокое быстродействие предлагаемого следящего электропривода.

где $b_{03} = b_{22}$; $b_{13} = b_{32}$; $a_{03} = a_{22}$; $a_{13} = a_{32}$, а ее численное значение для рассматриваемого примера принимает вид

$$W_{pn}(p) = \frac{8,626 \cdot 10^{-6} p^2 + 8,382 \cdot 10^{-5} p}{4,58 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,116 p + 1} \quad (9)$$

С учетом (9) расчетная модель предлагаемого следящего электропривода будет выглядеть следующим образом (рис. 5). График переходного процесса, построенный с помощью этой модели (рис. 6), показывает, что с упрощенным регулятором положения время переходного процесса составляет 0,049 с, а перерегулирование – 2,5 %. Следовательно, предлагаемый следящий электропривод сохраняет высокое быстродействие, но при этом техническая реализуемость регулятора положения не вызывает сомнений.

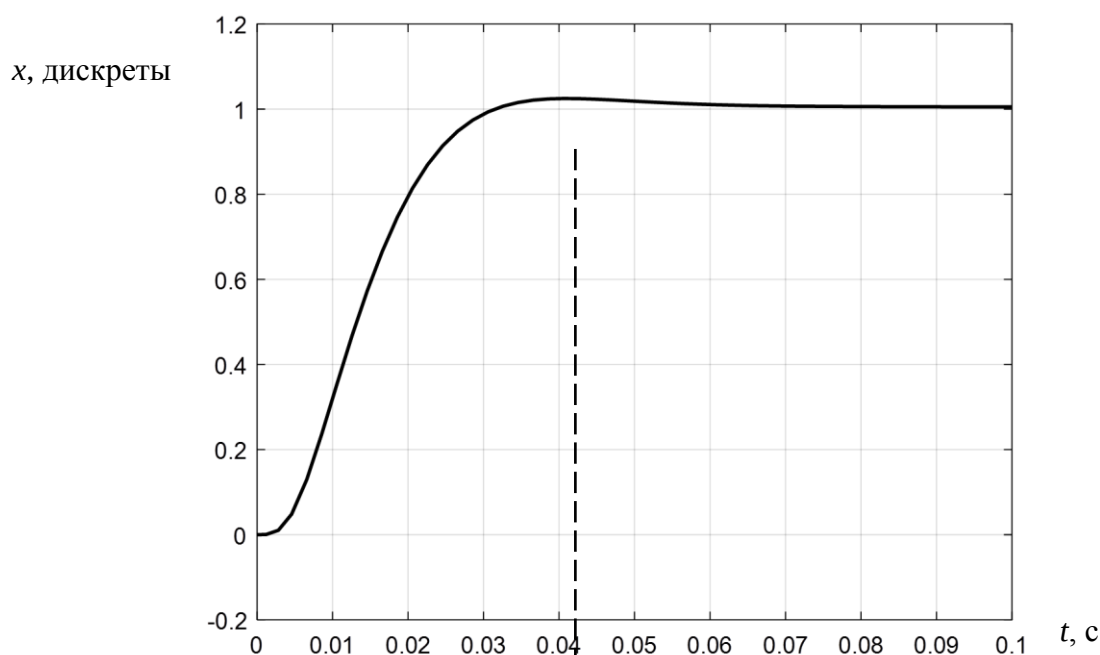


Рис. 6. График переходного процесса в предлагаемом следящем электроприводе

Выводы

1. Применение нестандартных регуляторов в следящих электроприводах с векторным управлением синхронным двигателем обеспечивает значительное повышение быстродействия при обработке управляющих воздействий.

2. Полученные формулы позволяют производить адекватный расчет параметров нестандартного регулятора положения позволяют по известным техническим данным элементов следящего электропривода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. В.М. Терехова. Москва: Изд. центр «Академия», 2005. 304 с.

2. **Михайлов О.П.** Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. Москва: Машиностроение, 1990. 304 с.

3. **Джанхотов В.В.** Исследование и разработка следящих электроприводов на базе вентильных двигателей с управлением от сигнального процессора для шагающего робота: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 245 с.

4. **Лисин С.Л.** Структурно-параметрический синтез быстродействующего следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем: дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2016. 179 с.

5. **Калачев Ю.Н.** Векторное регулирование (заметки практика). Москва: ЭФО, 2013. 63 с.

6. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Москва: Академия, 2006. 265 с.

7. Simovert Masterdrives Motion Control: Compendium. Germany: Siemens AG, 2006. 1498 p.

8. Теория автоматического управления: учебник для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика» в 2 ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др.; под ред. А.А. Воронова. Москва: Высшая школа, 1986. 367 с.

9. **Макаров И.М., Менский Б.М.** Линейные автоматические системы. Москва: Машиностроение, 1982. 504 с.

Байбиков Ильгиз Фяритович – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Стариков Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Ilgiz F. Baybikov – Postgraduate, Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Alexander V. Starikov – Dr. Sci. Tech., Professor, Head: Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 01.03.24, принята к опубликованию 14.03.24

**ЭМИССИЯ ГАРМОНИК ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ
БЛОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ЦЕПИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ
ВОЗМУЩЕНИЯХ**

В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, Р.Н. Пудовинников

**EMISSION OF MAGNETIZING CURRENT HARMONICS
OF A BLOCK TRANSFORMER IN THE STATOR WINDING CIRCUIT
OF A SYNCHRONOUS GENERATOR
UNDER GEOMAGNETIC DISTURBANCES**

V.V. Vakhnina, A.A. Kuvshinov, A.N. Chernenko, R.N. Pudovinnikov

Выполнено моделирование тестового воздействия геоиндуцированных токов, на блок «генератор (ТВФ-100-2) – трансформатор (ТДЦ-125000/220/10,5)», который осуществляет питание мощного узла потребления ($P_{нагр} = 83,125$ МВт, $Q_{нагр} = 29,75$ Мвар, $\cos \varphi = 0,95$) через двухцепную воздушную линию электропередачи протяженностью 160 км. Параметры тестового воздействия – амплитуда и длительность – заданы в соответствии с эталонным тестовым событием геомагнитного возмущения, представленным в стандарте надежности TPL-007-04 для высокоширотных регионов. Показано, что влияние геоиндуцированных токов на режим функционирования синхронного генератора начинается с момента насыщения магнитной системы блочного трансформатора вследствие обратной трансформации гармоник тока намагничивания в цепи статорных обмоток, существенно искажающих синусоидальность кривой мгновенных значений статорного тока. Определен коэффициент нелинейных искажений статорного тока, который достигает значения $THD = 55,59\%$ через 10 секунд после начала тестового воздействия геоиндуцированного тока. Показано, что в нарушение синусоидальности статорного тока доминирующий вклад вносят 2-я и 4-я гармоники тока намагничивания блочного трансформатора.

A test simulation of the impact of geo-induced currents on the “generator (TVF-100-2) – transformer (TDC-125000/220/10.5)” block, which supplies power to a powerful consumption unit ($P_{load} = 83.125$ MW, $Q_{load} = 29.75$ Mvar, $\cos \varphi = 0.95$), was performed through a double-circuit overhead power line with a length of 160 km. The parameters of the test impact – amplitude and duration – are set similar to the parameters of geomagnetic disturbances presented in the TPL-007-04 reliability standard for high-latitude regions. It is shown that the influence of geo-induced currents on the operating mode of a synchronous generator begins from the moment of saturation of the magnetic system of a block transformer due to the reverse transformation of magnetizing current harmonics in the circuit of stator windings, which significantly distort the sinusoidality of the curve of instantaneous values of the stator current. The coefficient of nonlinear distortion of the stator current has been determined, which reaches the value $THD = 55.59\%$ 10 seconds after the start of the test effect of the geo-induced current. It is shown that the dominant contribution to the violation of the sinusoidality of the stator current is made by the 2nd and 4th harmonics of the magnetizing current of the block transformer.

Ключевые слова: *синхронный генератор, блочный трансформатор, геоиндуцированный ток, ток намагничивания, высшие гармоники тока*

Введение

Существенная часть нагрузки современных энергосистем требует преобразования переменного тока промышленной частоты 50 Гц в постоянный ток или в ток другой частоты. К таким видам нагрузки относятся электрический транспорт, передача электроэнергии на постоянном токе, крупные выпрямительные установки для электролиза, мощный электропривод прокатных станов и другие нагрузки с преобразователями, работа которых неизбежно связана с генерацией в электрическую сеть высших гармоник тока, как правило, нечетных порядков. Например, шестифазные преобразователи генерируют в электрическую сеть 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю, 17-ю и т. д. гармоники тока, а двенадцатифазные преобразователи генерируют в электрическую сеть только 11-ю, 13-ю, 23-ю и т. д. гармоники тока.

Токи высших гармоник, протекая по обмоткам статора синхронного генератора, присоединенного к электрической сети через блочный трансформатор, искажают синусоидальную форму статорного тока. Степень искажения синусоидальности зависит от близости нелинейной нагрузки к месту присоединения синхронного генератора в данной энергосистеме. Высшие гармоники в составе статорного тока вызывают дополнительные потери в обмотке и активной стали статора, приводят к появлению в воздушном зазоре несинхронных магнитных полей, которые наводят в контурах ротора токи повышенной частоты, вызывающих местные нагревы, особенно интенсивные в торцевых зонах. В результате режим работы синхронного генератора утяжеляется, что в некоторых случаях может потребовать снижения нагрузки [1].

Кроме нагрузок с преобразователями, причиной нарушения синусоидальности статорного тока могут служить блочные трансформаторы, обмотки низкого напряжения которых непосредственно связаны

Keywords: *synchronous generator, block transformer, geo-induced current, magnetizing current, higher current harmonics*

со статорными обмотками синхронного генератора. В обычных условиях процессы перемагничивания магнитной системы блочного трансформатора протекают по симметричным циклам, не затрагивая область технического насыщения электротехнической стали, ток холостого хода при номинальном напряжении обмоток не превышает (0,3-0,9) % и гармоники тока намагничивания не оказывают влияния на работу синхронного генератора. Однако при геомагнитных возмущениях низкочастотные геоиндуцированные токи (ГИТ) проникают в заземленные обмотки высокого напряжения (ВН) блочных трансформаторов и вызывают однонаправленное насыщение магнитной системы, что приводит к многократному увеличению несинусоидального тока намагничивания [2, 3]. Наиболее чувствительны к воздействию ГИТ силовые трансформаторы большой мощности с броневого и бронестержневой конструкцией магнитной системы [4, 5], которые обычно используют в составе блоков «генератор-трансформатор» мощностью 100 МВА и более на крупных электростанциях. При геомагнитных возмущениях блочные трансформаторы будут осуществлять эмиссию высших гармоник тока намагничивания как в цепи статорных обмоток генераторов блока «генератор-трансформатор», так и в замыкающую электрическую сеть. Высшие гармоники могут привести к непреднамеренному срабатыванию релейной защиты электрооборудования энергосистемы. В статье представлено исследование насыщения магнитной системы блочного трансформатора и анализ гармонического состава статорного тока синхронного генератора блока «генератор-трансформатор», обусловленного воздействием низкочастотного ГИТ, которое решается путем компьютерного моделирования.

Исходные данные и методика выполнения исследований

На рис. 1 изображена расчетная схема для фрагмента обособленной энергосистемы высокоширотного региона РФ. В состав расчетной схемы включены блок «генератор-трансформатор» с синхронным генератором Г (турбогенератор ТВФ-100-2) и блочным трансформатором Т

(ТДЦ-125000/220/10,5) электростанции ЭС, двухцепная воздушная линия электропередачи ВЛЭП 220 кВ (провода АС-400, протяженность $L = 160$ км), автотрансформатор АТ (АТДЦТН-125000/220/110/10,5) понижающей подстанции ПС и мощный узел потребления ($P_{нагр} = 83,125$ МВт, $Q_{нагр} = 29,75$ Мвар, $\cos \varphi = 0,95$).

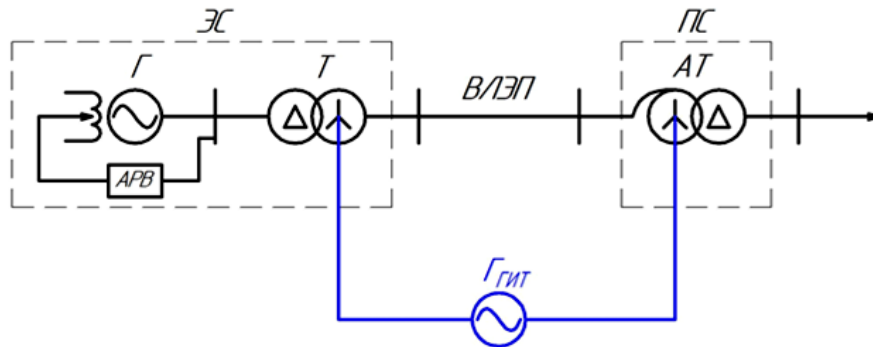


Рис. 1. Расчетная схема фрагмента обособленной энергосистемы

В исходном установившемся режиме функционирования обособленной энергосистемы синхронный генератор Г несет активную нагрузку $P = 83,78$ МВт при величине статорного тока 4607 А и коэффициенте мощности практически равным единице. Ток намагничивания (эффективное значение 1,72 А) блочного трансформатора Т соответствует паспортным данным.

Для исследования в расчетной схеме использовано возмущающее тестовое воздействие геоиндуцированного тока, которое воспроизводит только основные параметры регистрируемых всплесков ГИТ – амплитуду и длительность [6-8]. Для задания однонаправленного возмущающего воздействия геоиндуцированного тока между заземленными нейтральными блочного трансформатора Т и автотрансформатора АТ понижающей подстанции в расчетной схеме на рис. 1 включен источник геоэлектрического поля $\Gamma_{ГИТ}$, который описывается гармонической функцией

$$e_{ГИТ} = (E_{ГИТ} \cdot L) \cdot |\sin(2\pi f_{ГИТ} \cdot t)|, \quad (1)$$

где $E_{ГИТ}$ – амплитуда мгновенного значения напряженности источника геоэлектрического поля $\Gamma_{ГИТ}$.

Частота возмущающего воздействия ГИТ намного меньше частоты питающей сети, поэтому мгновенные значения определяются вариациями напряженности геоэлектрического поля и активными сопротивлениями контура протекания $R_{ГИТ}$

$$i_{ГИТ} = I_{ГИТ} \cdot |\sin(2\pi f_{ГИТ} \cdot t)|, \quad (2)$$

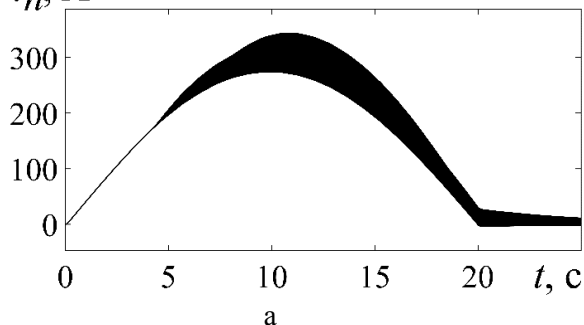
где $I_{ГИТ} = \frac{E_{ГИТ} \cdot L}{R_{ГИТ}}$ – амплитуда геоиндуцированного тока.

Параметры тестового воздействия напряженности геоэлектрического поля вида (1) выбраны таким образом, чтобы амплитуда ГИТ в каждой фазной обмотке ВН блочного трансформатора Т составила 100 А, а продолжительность протекания 20 с. В результате для расчетной схемы на рис. 1 для моделирования получены значения параметров источника геоэлектрического поля $E_{ГИТ} = 6,94$ В/км, $f_{ГИТ} = 0,05$ Гц, соответствующие эталонному тестовому событию геомагнитного возмущения для высокоширотных регионов, которое приводится в стандарте надежности TPL-007-04 [9].

Моделирование функционирования обособленной энергосистемы высокоширотного региона РФ в условиях воздействия геоиндуцированного тока выполнено в программном пакете MATLAB.

Результаты моделирования

На рис. 2 а показан характер изменения тока в нейтрали блочного трансформатора Т, который до момента времени $t_{\mu(1)} = 4,3$ с i_n , А



определяется только величиной ГИТ в фазных обмотках ВН, а затем в составе тока нейтрали появляются гармоники тока намагничивания нулевой последовательности, обусловленные насыщением магнитной системы блочного трансформатора Т. На рис. 2 б представлены результаты моделирования тока намагничивания блочного трансформатора Т при тестовом воздействии ГИТ вида (2).

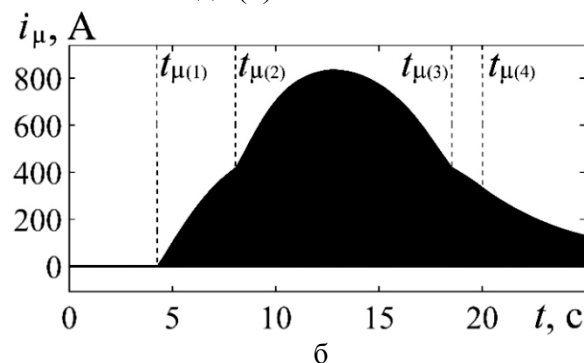


Рис. 2. Ток в нейтрали (а) и ток намагничивания (б) блочного трансформатора Т

На кривой тока намагничивания (рис. 2 б) можно выделить четыре характерных интервала. Первый интервал ($0 - t_{\mu(1)} = 4,3$ с) характеризуется латентным тестовым воздействием ГИТ, на котором сохраняется прежняя величина тока намагничивания блочного трансформатора Т, но потокосцепление обмоток ВН начинает складываться из двух составляющих

$$\Psi_{\Sigma}(t) = \Psi_{ГИТ}(t) + \Psi_U(t). \quad (3)$$

Составляющая потокосцепления $\Psi_{ГИТ}(t)$ обусловлена протеканием геоиндуцированного тока по обмоткам ВН блочного трансформатора Т и определяется соотношением:

$$\Psi_{ГИТ}(t) = \frac{I_{ГИТ}}{\omega \cdot b_{\mu}} \cdot \sin(2\pi f_{ГИТ} \cdot t), \quad (4)$$

где ω – угловая частота напряжения обмоток ВН; b_{μ} – проводимость ветви намагничивания блочного трансформатора Т.

Составляющая потокосцепления $\Psi_U(t)$ обусловлена напряжением обмоток ВН и определяется соотношением

$$\Psi_U(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot \omega} \cdot \cos \omega t = \Psi_m \cdot \cos \omega t, \quad (5)$$

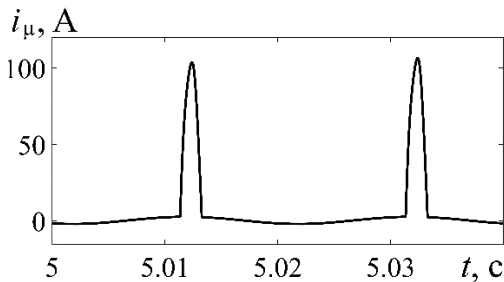
где Ψ_m – амплитудное значение потокосцепления обмоток ВН при номинальном напряжении.

При проектировании силовых трансформаторов амплитудное значение индукции магнитного поля в стержне магнитной системы выбирается равным $B_m = (1,6 - 1,65)$ Тл при номинальной величине напряжения обмоток, а величина индукции насыщения большинства современных марок высококачественной электротехнической стали составляет $B_S \cong 2,0$ Тл. Реальная кривая намагничивания заметно отличается от линейной зависимости только в области перегиба и соответственно в очень узком диапазоне значений магнитной индукции $B = (0,95 - 1,03) B_S$ [10]. Эта особенность воспроизводится кусочно-линейной аппроксимацией с двумя точками излома, принятой в стандартном блоке Saturable Transformer MATLAB. Для первой точки излома можно принять $B_{S(1)} = 0,95 B_S$, для второй точки излома – $B_{S(2)} = 1,03 B_S$. Тогда соотношения $B_{S(1)} / B_m = (1,15 - 1,19)$ и $B_{S(2)} / B_m = (1,25 -$

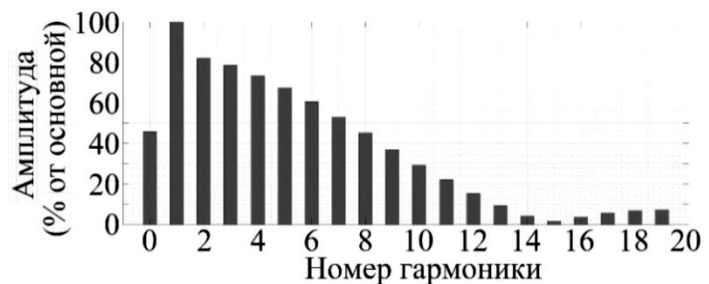
1,29) легко трансформируются в аналогичные по форме соотношения $\Psi_{S(1)} / \Psi_m = (1,15 - 1,19)$ и $\Psi_{S(2)} / \Psi_m = (1,25 - 1,29)$ для потокоцеплений (здесь $\Psi_{S(1)}$, $\Psi_{S(2)}$ – потокоцепления обмотки ВН, которые соответствуют первой и второй точкам излома кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания блочного трансформатора Т).

В момент времени $t = t_{\mu(1)}$ за счет возрастания под воздействием ГИТ составляющей потокоцепления $\Psi_{ГИТ}(t)$ наступает равенство $\Psi_{\Sigma}(t_{\mu(1)}) = \Psi_{S(1)}$, означающее начало процесса насыщения магнитной системы блочного трансформатора Т и увеличения тока намагничивания. Величина геоиндуцированного тока в момент време-

ни $t = t_{\mu(1)}$ составляет 62,52 А. На втором интервале от $t_{\mu(1)} = 4,3$ с до $t_{\mu(2)} = 8,1$ с протекает процесс начального насыщения, на котором суммарное потокоцепление обмотки ВН блочного трансформатора Т находится в пределах $\Psi_{S(1)} < \Psi_{\Sigma}(t) < \Psi_{S(2)}$, а ток намагничивания приобретает форму, показанную на рис. 3 а. Состояние насыщения магнитной системы блочного трансформатора продолжается в течение $\tau_{\varphi} \cong 1,86$ мс, что составляет около 9,3 % продолжительности периода генераторного напряжения. Амплитуда бросков тока намагничивания по сравнению с амплитудой паспортного тока холостого хода 2,43 А многократно возрастает до значений (99,3 – 104,5) А.



а



б

Рис. 3. Временная диаграмма (а) и гармонический состав (б) бросков тока намагничивания через 5 с после начала тестового воздействия ГИТ

Мгновенные значения $i_{\mu}(t)$ и амплитуда $I_{\mu \max}$ бросков тока намагничивания могут быть представлены простыми аналитическими выражениями [11]

$$i_{\mu}(t) = I_{m(\mu)} \cdot (\cos \varphi + \cos \omega t), \quad (6)$$

$$I_{\mu \max} = I_{m(\mu)} \cdot (1 - \cos \varphi), \quad (7)$$

где $I_{m(\mu)}$ – амплитуда тока намагничивания в случае насыщения магнитной системы

блочного трансформатора Т в течение всего периода сетевого напряжения; $\varphi = \omega \tau_{\varphi} / 2$ – фазовый угол насыщения магнитной системы блочного трансформатора Т (при $\tau_{\varphi} \cong 1,86$ мс, как показано на рис. 3 а, величина фазового угла насыщения составит $\varphi \cong 16,55$ гр.).

Аналитические выражения для определения амплитуд n -й гармоники, полученные из (6) и (7):

$$I_{\mu(n)} = \left\{ \frac{I_{\mu \max}}{\pi \cdot (1 - \cos \varphi)} \cdot \left[\frac{\sin(n-1)\varphi}{(n-1)} + \frac{\sin(n+1)\varphi}{(n+1)} - \frac{2}{n} \cos \varphi \cdot \sin(n\varphi) \right] \right\} \quad (8)$$

и основной гармоники тока намагничивания

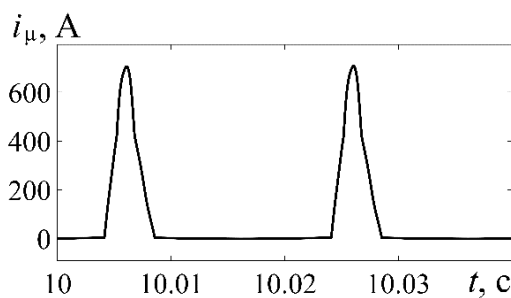
$$I_{\mu(1)} = \frac{I_{\mu \max}}{2\pi} \cdot \frac{(2\varphi - \sin 2\varphi)}{(1 - \cos \varphi)}. \quad (9)$$

Результаты расчетов по формулам (8) и (9) достаточно хорошо согласуются с результатом компьютерного моделирования, представленного на рис. 3 б, хотя дают не-

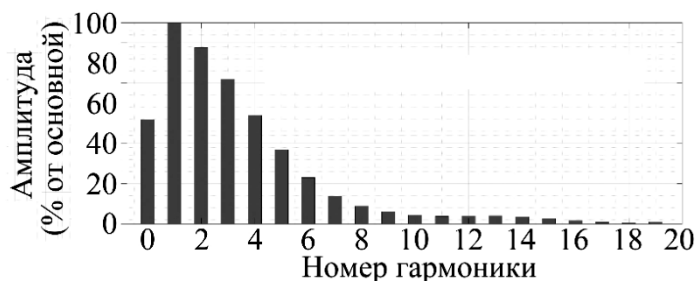
сколько заниженный результат, обусловленный тем, что не учитывают ток намагничивания на интервалах между смежными бросками. Максимальное отклонение имеет место для основной гармоники тока намагничивания, расчетное значение которой 12,46 А по выражению (9) меньше значения 15,29 А, представленное на рис. 3 б, но на величину практически равную амплитуде тока намагничивания (2,43 А) до насыщения магнитной системы.

В момент времени $t_{\mu(2)} = 8,1$ с потокосцепление обмотки ВН достигает значения $\Psi_{\Sigma}(t) = \Psi_{S(2)}$, и начинается процесс технического насыщения магнитной системы блочного трансформатора Т, который продолжается до момента времени $t_{\mu(3)} = 18,51$ с. Третий интервал ($t_{\mu(2)} - t_{\mu(3)}$) отчетливо наблюдается на рис. 2 по характерному излому огибающей тока намагничивания. На данном интервале потокосцепление обмотки ВН поддерживается за счет ГИТ в области технического насыщения, т. е. на уровне $\Psi_{\Sigma}(t) > \Psi_{S(2)}$. Временная диаграмма, изображенная на рис. 4 а, показывает характер из-

менения мгновенных значений бросков тока намагничивания на протяжении двух периодов сетевого напряжения, начиная с момента времени $t \approx 10,0$ с до момента времени $t \approx 10,04$ с. Как видно, переход в область технического насыщения сопровождается значительным увеличением амплитуды бросков тока намагничивания (до ≈ 710 А) и фазового угла насыщения (до 40 гр.), причем переход из области начального в область технического насыщения сопровождается заметным изломом кривой мгновенных значений. Для аналитического описания формы бросков тока намагничивания можно использовать выражение (6), а для гармонического анализа – выражения (8), (9), однако в данном случае из-за искажения формы кривой мгновенных значений только для получения предельных оценок. В частности, амплитуда основной гармоники тока намагничивания, определенная по выражениям (8), (9), составляет 198,5 А, что превышает почти на 22,5 % значение (153,7 А), полученное по результату компьютерного моделирования.



а



б

Рис. 4. Временная диаграмма (а) и гармонический состав (б) бросков тока намагничивания через 10 с после начала тестового воздействия ГИТ

Сравнение диаграмм, изображенных на рис. 3 б и рис. 4 б, позволяет отметить, что переход состояния магнитной системы блочного трансформатора Т из области начального насыщения в область технического насыщения не изменяет качественный состав гармоник тока намагничивания: присутствуют как нечетные, так и четные гармоники, однако при этом изменяется процентное содержание отдельных гармо-

ник относительно основной гармоники тока намагничивания.

К моменту времени $t_{\mu(3)} = 18,51$ с величина ГИТ снижается до 23,2 А, вызывая уменьшение амплитуды бросков тока намагничивания до 420 А, а потокосцепления обмотки ВН до значения $\Psi_{\Sigma}(t) = \Psi_{S(2)}$. На четвертом интервале состояние магнитной системы блочного трансформатора Т возвращается в область начального насыщения и

продолжает находиться в этом состоянии даже после прекращения тестового воздействия ГИТ в момент времени $t_{u(4)} = 20$ с, но пока потокоцепление обмотки ВН $\Psi_{\Sigma}(t) = \Psi_{S(1)}$. Далее амплитуда бросков тока намагничивания уменьшается практически по экспоненциальному закону с постоянной времени, равной $\approx 5,4$ с. Состояние магнитной системы блочного трансформатора Т вернется в исходное состояние нормального режима работы с паспортной величиной тока намагничивания через интервал времени, равный $\approx 21,6$ с (на рис. 2 б данный интервал не показан). Таким образом, в результате тестового воздействия геоиндуцированного тока, продолжавшегося 20 с, магнитная система блочного трансформатора находится в состоянии насыщения в течение $\approx 37,3$ с, т. е. почти в два раза дольше тестового воздействия. Можно также отметить, что величина геоиндуцированного тока достигает амплитудного значения 100 А в момент времени $t \approx 10$ с, однако амплитуда бросков тока

намагничивания достигает максимального значения 840 А в момент времени 12,89 с (см. рис. 2 б), т. е. с запаздыванием на 2,89 с.

Негативным следствием насыщения магнитной системы блочного трансформатора Т служит эмиссия гармоник тока намагничивания как на сторону низкого напряжения (НН) в цепи статорных обмоток синхронного генератора Г, так и на сторону ВН в цепи замыкающей воздушной линии электропередачи 220 кВ. На рис. 5 представлены полученные в результате компьютерного моделирования временная диаграмма мгновенных значений (а) и гармонический состав (б) тока статорных обмоток синхронного генератора Г. В кривой тока статора (рис. 5 б) наибольшими являются вторая (48 % от основной гармоники) и четвертая (21,5 % от основной гармоники). Пятая гармоника не превышает 3,5 % от основной гармоники, остальные гармоники в составе статорного тока синхронного генератора Г практически отсутствуют.

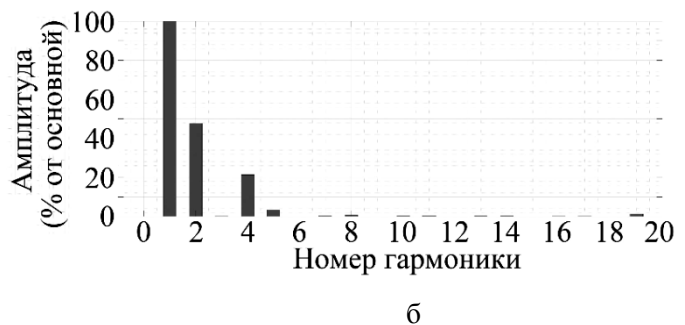
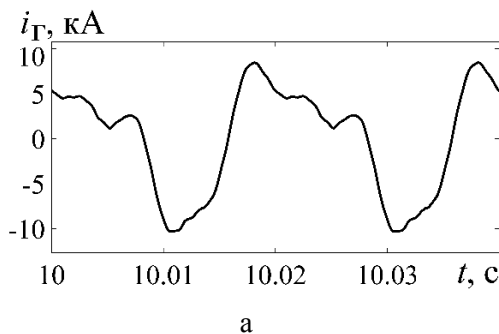


Рис. 5. График мгновенных значений (а) и гармонический состав (б) статорного тока через 10 с после начала тестового воздействия ГИТ

Сопоставление гармонического состава тока намагничивания блочного трансформатора Т (рис. 4 б) и тока статорных обмоток синхронного генератора Г (рис. 5 б) для одного и того же момента времени – 10 с после начала тестового воздействия ГИТ подтверждает, что вторая и четвертая гармоники появляются только при однонаправленном насыщении магнитной системы блочного трансформатора Т. Необходимо отметить, что на рис. 4 б указаны значения гармоник тока намагничивания, приведенные к стороне ВН блочного транс-

форматора Т, а на рис. 5 б указаны значения гармоник статорного тока, приведенные к стороне НН блочного трансформатора Т и соответственно статорных обмоток синхронного генератора Г. Отсутствие в составе статорного тока гармоник более высоких порядков ($n > 5$) обусловлено двумя причинами. Во-первых, гармоники тока намагничивания кратные трем образуют системы нулевой последовательности и замыкаются в обмотках низкого напряжения блочного трансформатора Т, соединенных в треугольник. Эмиссия остальных

гармоник тока намагничивания происходит как в цепи статорных обмоток, так и в цепи примыкающей воздушной линии электропередачи, причем в количественных соотношениях обратно пропорциональных величинам эквивалентных сопротивлений указанных цепей на частоте соответствующей гармоники относительно контура намагничивания блочного трансформатора.

В таблице представлены численные значения гармоник тока намагничивания $I_{\mu(n)эфф}$, определенные по рис. 4 б, значения гармоник тока статора $I_{Г(n)эфф}$, определен

ные по рис. 5 б предельные оценки гармоник тока статора $I_{Г(n)эфф}^{(np)}$ и гармоник тока в примыкающей воздушной линии электропередачи $I_{ВЛЭП(n)эфф}$, рассчитанные по выражениям:

$$I_{Г(n)эфф}^{(np)} = \sqrt{3} \cdot K_T \cdot I_{\mu(n)эфф}, \quad (10)$$

$$I_{ВЛЭП(n)эфф} = \frac{I_{Г(n)эфф}^{(np)} - I_{Г(n)эфф}}{\sqrt{3} \cdot K_T}, \quad (11)$$

где K_T – коэффициент трансформации блочного трансформатора Т.

Численные значения гармоник тока намагничивания, статорного тока и тока примыкающей воздушной линии электропередачи

Номер гармоники	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\mu(n)эфф}$, А	80	108,7	95,6	78,2	58,7	40,2	23,9	15,2	9,7	8,7	4,3
$I_{Г(n)эфф}$, А	0	5272,9	2531	0	1133,7	184,5	0	0	0	0	0
$I_{Г(n)эфф}^{(np)}$, А	0	3943,4	3470,6	0	2129,6	1459,2	0	552,1	354,9	0	157,8
$I_{ВЛЭП(n)эфф}$, А	80	38	25,9	0	27,4	31,1	0	15,2	9,7	0	4,3

Для гармоник высших порядков ($n \geq 2$) данные таблицы позволяют отметить характерную особенность, которая заключается в том, что с возрастанием порядкового номера увеличивается эмиссия тока намагничивания в цепи примыкающей ВЛЭП. Например, только 27,08 % второй гармоники тока намагничивания попадает в примыкающую ВЛЭП, для четвертой гармоники тока намагничивания это уже 46,68 %, а для пятой гармоники – 77,36 %. Остальные гармоники более высоких порядков полностью замыкаются в примыкающей воздушной линии электропередачи. Данное обстоятельство объясняется тем, что с ростом порядкового номера гармоники увеличивается емкостная проводимость воздушной линии электропередачи и индуктивное сопротивление статорных обмоток синхронного генератора Г.

Обсуждение результатов моделирования

Доминирующей является основная гармоника статорного тока (5272,9 А,

50 Гц), которая обеспечивает энергетический процесс выдачи синхронным генератором активной и реактивной мощности. При этом активная составляющая статорного тока (4607 А) остается неизменной, поскольку на всем интервале воздействия тестового выброса ГИТ мощность турбины не изменяется, а реактивная составляющая статорного тока достигает значения 2565,09 А. Оценка статорного тока $I_{Г(n)эфф}^{(np)} = 3943,37$ А, представленная в таблице, определяет предельное значение реактивной составляющей, появление которой может инициировать основная гармоника тока намагничивания блочного трансформатора. Сравнение достигнутого значения реактивной составляющей тока с предельной оценкой позволяет заключить, что компенсация возрастающей под воздействием тестового выброса ГИТ мощности намагничивания блочного трансформатора почти на 25 % обеспечивается за счет зарядной мощности примыкающих

ВЛЭП. Таким образом, за 10 с воздействия тестового выброса ГИТ статорный ток возрастает от значения 4607 А до значения 5961 А, определенного с учетом второй, четвертой и пятой гармоник, а коэффициент загрузки синхронного генератора по статорному току возрастает от значения 0,67 в исходном режиме до значения 0,87 в рассматриваемый момент времени.

Симметричной перегрузки по току статора в результате воздействия тестового выброса ГИТ в рассмотренном случае не возникает потому, что в исходном режиме синхронный генератор был нагружен только на 67 %. Однако несинусоидальность статорного тока, количественно оцениваемая коэффициентом искажения $\text{THD} = 52,68 \%$ (рис. 5 б), представляет серьезную опасность для генераторов [12] и может привести к срабатыванию токовой защиты обратной последовательности на отключение и к последующему развитию системной аварии в энергосистеме.

Заключение

1. С использованием компьютерного моделирования выполнены исследования функционирования блока «генератор-

трансформатор» обособленной энергосистемы высокоширотного региона РФ при тестовом воздействии геоиндуцированного тока. В качестве исходных данных для расчета параметров источника геоэлектрического поля использованы параметры эталонного геомагнитного возмущения, опубликованные в стандарте надежности TPL-007-04.

2. При моделировании получено, что тестовое воздействие геоиндуцированного тока вызывает высокий уровень несинусоидальности статорного тока уже на 10-й секунде ($\text{THD} = 52,68 \%$), что недопустимо даже для недогруженного турбогенератора.

3. Эмиссия токов обратной последовательности в цепи статорных обмоток синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора может привести к срабатыванию защиты обратной последовательности. Поэтому на основании выполненных исследований можно предположить, что трансформация токов обратной последовательности в статорные обмотки генераторов могла быть одной из причин отключения генерации, например, при геомагнитной буре в 2003 году в Южной Африке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коган Ф.Л. Развитие конструкций, параметры и режимы мощных турбогенераторов. Москва: ИНФРА-М, 2017. 320 с.

2. An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents / T. Nobuo, O. Tetsuo, M. Fumihiko, S. Sadamu, F. Yasuo // IEEE Transaction on Power Delivery. 1994. Vol. 9. № 2. P. 1173-1179.

3. Сивоконь В.П., Сероветников А.С., Писарев А.В. Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 3. С. 30-34.

4. Силовые трансформаторы: справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. Москва: Энергоиздат, 2004. 616 с.

5. Pirjola R., Viljanen A., Pulkkinen A. Research of geomagnetically induced currents (GIC) in Finland // In Proc. 7th Int. Symp. Electromagn. Compat. Electromagn. Ecology, 2007. P. 269-272.

6. Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. С. 72-110.

7. Экстремальные величины геоиндуцированных токов в энергосистеме / Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов, В.А. Билин, В.Г. Николаев // Physics of Auroral Phenomena: Proc. XLII Annual Seminar. Apatity, 2019. P. 53-56.

8. A Modified IEEE 118-Bus Test Case for Geomagnetic Disturbance Studies. Part I: Model Data / A. Haddadi, A. Rezaei-Zare, L. Gerin-Lajoie, R. Hassani, J. Mahseredjian //

IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2020. Vol. 62. Iss. 3. P. 966-975.

9. NERC Standard TPL-007-4 Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Events. March 19, 2020.

10. Прокат холоднокатаный тонколистовой из электротехнической анизотропной стали: каталог продукции. Новоліпецкый металлургический комбинат, 2018.

11. Реактивная нагрузка синхронного

генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора под воздействием квазипостоянных токов / А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, Р.Н. Пудовинников // Промышленная энергетика. 2021. № 4. С. 11-19.

12. ГОСТ IEC 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики.

Вахнина Вера Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Кувшинов Алексей Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Черненко Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Пудовинников Роман Николаевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Vera V. Vakhnina – Dr. Sci. Tech., Professor, Head: Department of Power Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Aleksey A. Kuvshinov – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Electrical Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Aleksey N. Chernenko – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Roman N. Pudovinnikov – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Статья поступила в редакцию 21.02.24, принята к опубликованию 14.03.24

УДК 621.365.55: 621.314.58

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СВЧ-УСТАНОВКИ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ПАРАМЕТРОВ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

И.И. Артюхов, М.Д. Николаев

OPERATION OF MULTIGENERATOR CONVEYOR MICROWAVE INSTALLATION UNDER CONDITIONS OF THE SUPPLY NETWORK CHANGING PARAMETERS

I.I. Artyukhov, M.D. Nikolaev

Для осуществления широкого спектра технологических процессов применяют СВЧ-установки конвейерного типа. Если эти установки получают электроэнергию от мощной промышленной сети, то применение типовых решений для построения магнетронных генераторов не вызывает проблем. Однако при подключении СВЧ-установки к источнику энергии ограниченной мощности, например, дизель-генератору, может происходить нарушение ее работоспособности. В статье анализируется влияние параметров питающей сети на работу СВЧ-установки, рассматриваются варианты решения проблемы.

Ключевые слова: СВЧ-установка, магнетрон, система электропитания

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий. Основные преимущества использования СВЧ-нагрева в термических процессах обусловлены особенностями ее поглощения. СВЧ-энергия преобразуется в тепло внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов [1]. Области применения СВЧ-нагрева являются деревообрабатывающая, резинотехническая, текстильная, фармацевтическая отрасли промышленности [2]. Большое число СВЧ-

To implement a wide range of technological processes, conveyor microwave installations are used. If these installations receive electricity from the powerful industrial network, then the use of standard solutions for the construction of magnetron generators does not cause problems. However, when the microwave installation is connected to a power source of limited capacity, for example, in the form of a diesel generator, its performance may be impaired. The article analyzes the influence of supply network parameters on the microwave installation operation. The article analyzes the influence of supply network parameters on the microwave installation operation, and considers variants of the problem solution.

Keywords: microwave installation, magnetron, power supply system

установок используется, в частности, для термообработки сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктов, которые обычно содержат много воды и поэтому хорошо поглощают СВЧ-энергию. При этом широкое применение получили установки конвейерного типа [3], в которых СВЧ-энергия распределяется по всему объему установки за счет применения нескольких генераторов СВЧ-колебаний.

Вариант конструкции СВЧ-установки конвейерного типа показан на рис. 1. Основными узлами этой установки являются

конвейер с элементами подачи и приема обрабатываемого материала, рабочие камеры с генераторами СВЧ-колебаний и вентиляционная система. Кроме того, конвейер оснащен системой, которая предотвращает утечку СВЧ-энергии за пределы установки. Ленточный конвейер состоит из замкнутого тягового элемента (ленты), являющегося одновременно и рабочим элементом, который перемеща-

ется по стационарным роликовым опорам и огибает направляющие устройства. Верхняя ветвь ленты, на которой расположен груз, движется по стационарным желобчатым роликовым опорам. Нижняя часть ленты (холостая) движется, опираясь на прямые роликовые опоры. Лента приводится в движение от приводного барабана, связанного через передаточный механизм с электродвигателем.

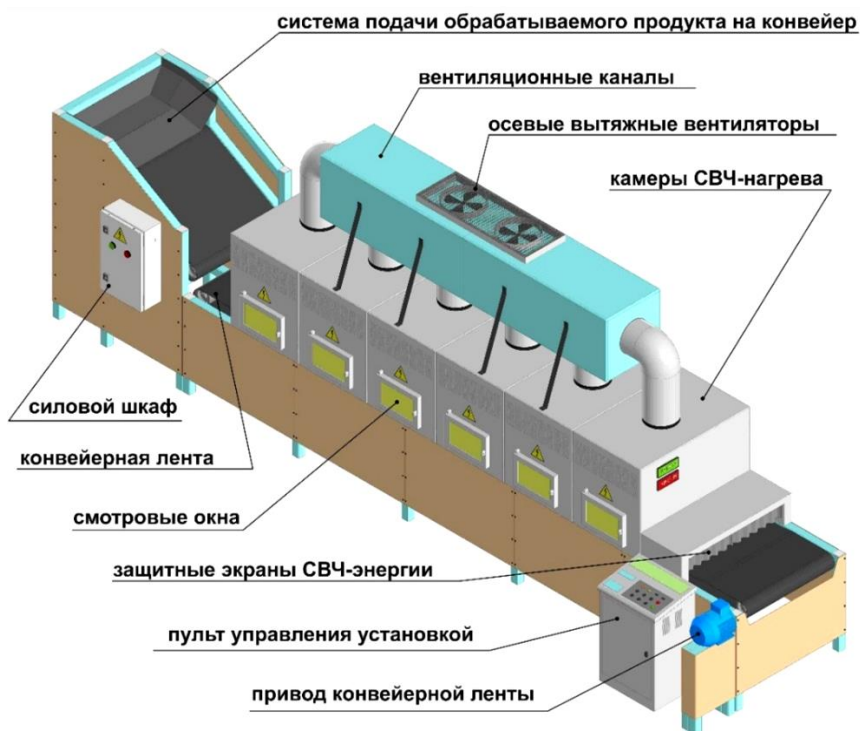


Рис. 1. Конструкция СВЧ-установки конвейерного типа

Рабочие камеры, оснащенные генераторами СВЧ-колебаний, расположены над конвейерной лентой и образуют туннель. Обрабатываемые продукты перемещаются в туннеле через рабочие камеры и нагреваются до необходимой температуры. В качестве генераторов СВЧ-колебаний наиболее часто применяют пакетированные магнетроны, работающие на частоте 2450 МГц с выходной мощностью 1300...1600 Вт. Для обеспечения однородного поля магнетроны расположены в шахматном порядке. Электромагнитные волны посылаются через прямоугольные излучающие волноводы в верхней части туннеля.

Во время работы СВЧ-установки конвейерного типа происходит испарение влаги из

обрабатываемых продуктов, которое может негативно сказываться на рабочем процессе. Для предотвращения попадания пара внутрь волноводов и обеспечения заданной влажности готового продукта используется система вентиляции с пароотводами.

Схема электроснабжения мультигенераторной СВЧ-установки конвейерного типа представлена на рис. 2. Для равномерной загрузки сети на каждую фазу подключены по два магнетронных генератора. Кроме того, в состав электрооборудования СВЧ-установки входят преобразователь частоты ПЧ для управления электродвигателем М1 привода конвейера, а также электродвигатели М2 и М3 вытяжных вентиляторов.

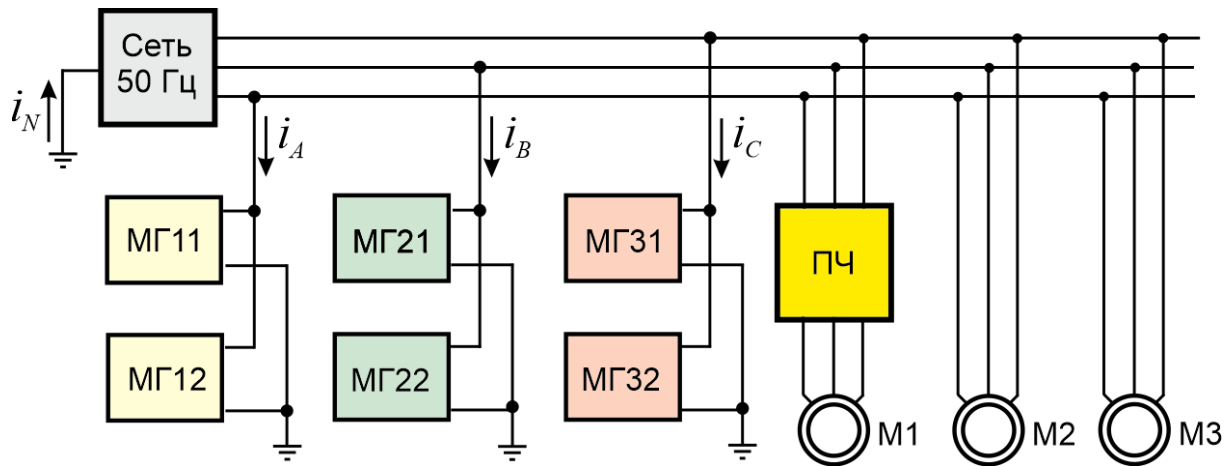


Рис. 2. Схема электроснабжения мультигенераторной СВЧ-установки

Для функционирования магнетрона необходима система электропитания из двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи.

Режим работы магнетрона по анодной цепи определяется точкой пересечения

вольт-амперной характеристики (ВАХ) магнетрона и внешней характеристики источника анодного питания [1].

ВАХ магнетрона имеет явно выраженный нелинейный характер (рис. 3). Она начинается с крутого участка, показанного пунктирной линией.

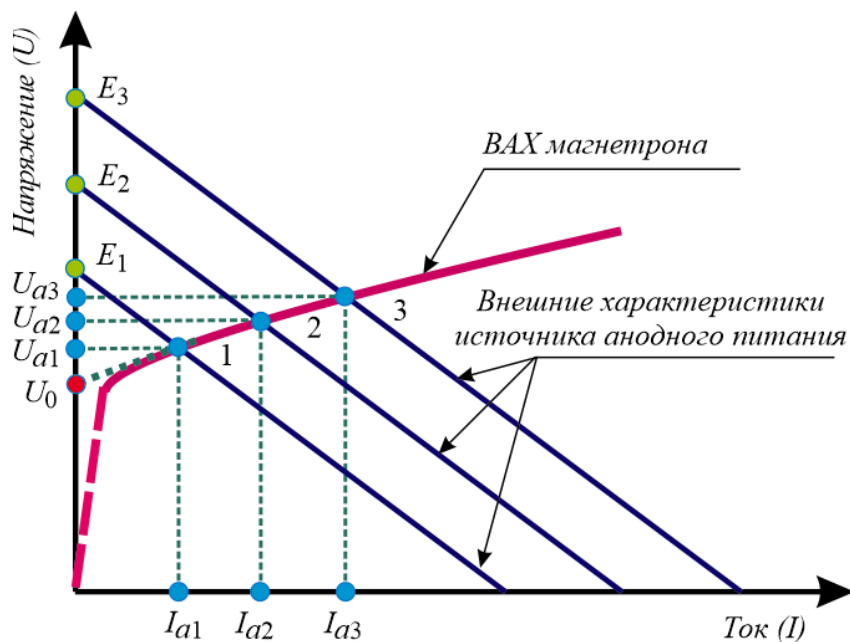


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики магнетрона и источника анодного питания

Область с небольшим наклоном от оси токов, представляющая режим излучения магнетрона, следует за точкой изгиба. В области анодных напряжений, меньших порогового напряжения ($U_a < U_0$), условия синхронизации между носителями заряда и высокочастотным полем не выполняются, поэтому колебания и ток анода не индуци-

руются. Самовозбуждение магнетрона и внезапное увеличение анодного тока происходят, как только напряжение анода достигает порога. Впоследствии небольшое изменение анодного напряжения U_a приводит к резким изменениям анодного тока I_a , величина которого определяется пропускной способностью катодного излучения.

Существуют различные варианты построения магнетронных генераторов. Схема одного из них показана на рис. 4. Основу генератора составляет магнетрон VL. Электропитание цепи анод – катод магнетрона осуществляется с применением однофазного мостового выпрямителя D1-D4, вход которого подключен к высоковольтной обмотке повышающего трансформатора ТА.

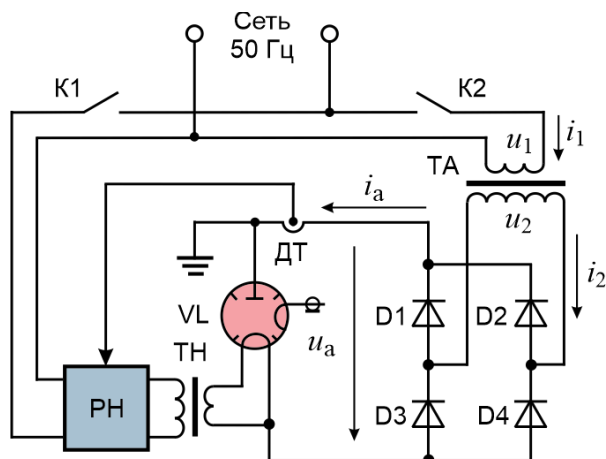


Рис. 4. Схема магнетронного генератора

Первичная обмотка этого трансформатора подключается к фазному напряжению сети через контакт K2. Накал катода осуществляется с помощью трансформатора ТН, первичная обмотка которого соединена с фазой источника питания через регулятор напряжения РН. В начальный момент работы СВЧ-установки замыкается контакт K1, который подключает РН к сети. В течение определенного времени катод подогревается, затем ток накала уменьшается. Затем срабатывает контакт K2 и подает напряжение на трансформатор ТА.

Для получения информации о влиянии параметров питающей сети на режим работы магнетронных генераторов разработана имитационная модель в среде MATLAB + Simulink [4]. Схема модели показана на рис. 5. Предполагалось, что в СВЧ-установке применены магнетроны 2М164 [5]. Заметим, что при составлении модели не учтены элементы цепи накала, так как они потребляют очень малую часть энергии по сравнению со всей системой электропитания. При этом было принято, что генерация создается тремя магнетронами. Это до-

пущение не влияет на результаты исследования, однако существенно упрощает процесс вычислений.

Питающая сеть представлена тремя источниками переменного напряжения с последовательно соединенными активно-индуктивными сопротивлениями. При моделировании полагалось, что индуктивность и активное сопротивление источника энергии составляют 500 мкГн и 0,1 Ом соответственно.

Магнетронные генераторы представлены подсистемами *Magnetron Generator* (рис. 6). Магнетрон 2М164 моделируется схемой замещения в виде последовательно соединенных диода (блок *Diode*), динамического сопротивления (блок *Rdin*) и включенного во встречном направлении источника постоянного напряжения (блок *DC Voltage Source*), величина которого соответствует пороговому напряжению U_0 моделируемого магнетрона. Для магнетрона 2М164 на основании его паспортных характеристик были приняты следующие значения: $R_{din} = 100 \text{ Ом}$; $U_0 = 3100 \text{ В}$.

Цепь анодного питания моделируют блоки *Transformer* и *Universal Bridge*. Параметры блока *Transformer* представлены в табл. 1. В составе модели на рис. 5 имеются также блоки *RMS*, предназначенные для расчета действующих значений напряжений и токов. Кроме того, в модель включены элементы (блоки *Product*, *Mean* и *Gain*), с помощью которых вычисляется выходная мощность магнетронного генератора. На основании характеристик магнетрона 2М164 было сделано допущение о том, что его КПД является постоянной величиной, которая задается в блоках *Gain*.

Информация о действующих значениях фазных напряжений отображаются блоками *Display1...Display3*. Блоки *Display4...Display6* показывают действующие значения токов, потребляемых из сети. Ток нулевого провода можно узнать с помощью блока *Display7*.

Выходные мощности магнетронов можно узнать с помощью блоков *Display8...Display10*.

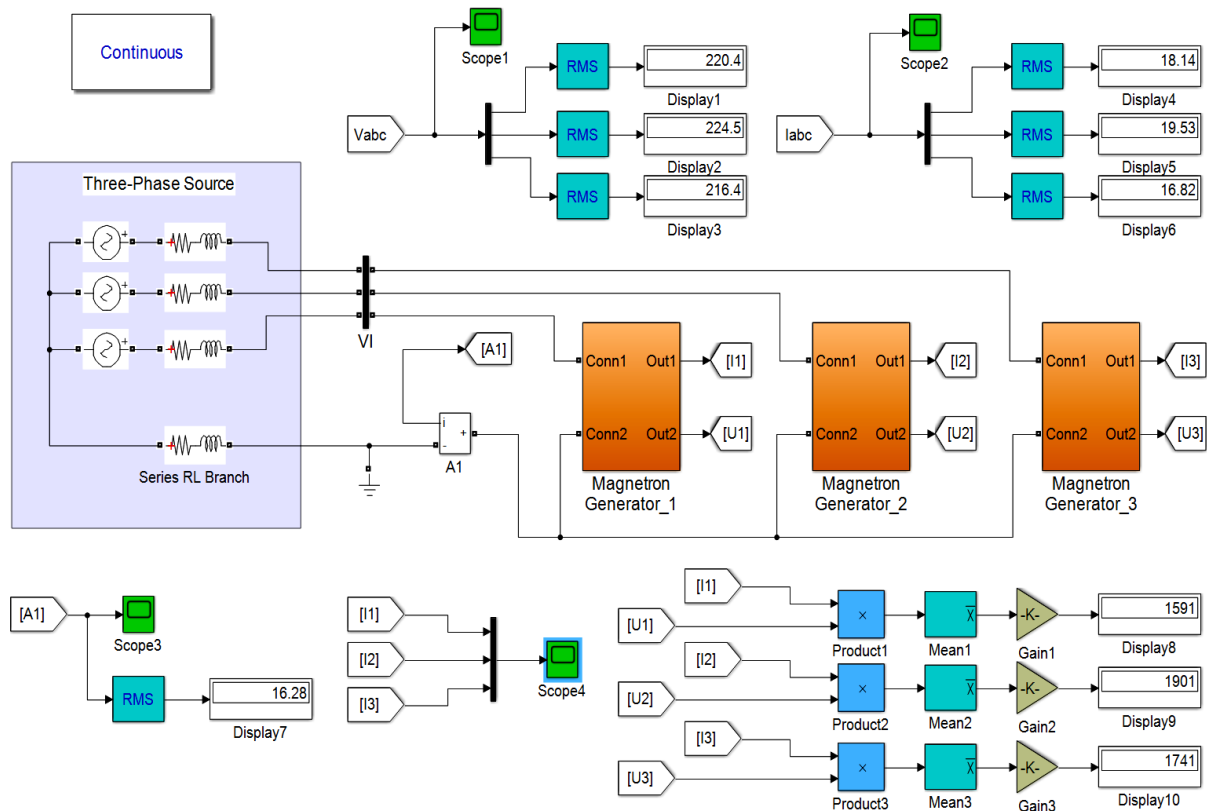
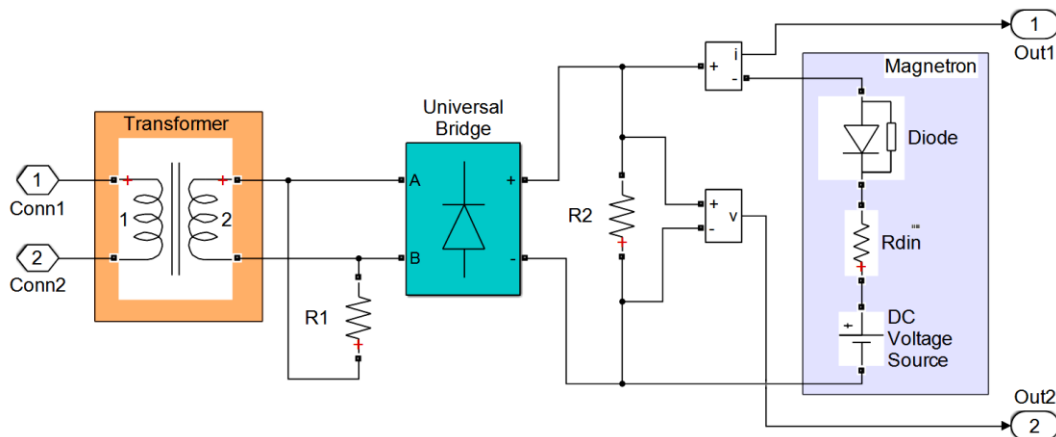


Рис. 5. Имитационная модель системы электропитания магнетронных генераторов


 Рис. 6. Схема подсистемы *Magnetron Generator*

На рис. 7 показаны графики зависимостей выходной мощности магнетрона при изменении сетевого напряжения в пределах, допускаемых ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [6]. Зависимости рассчитаны для ряда значений напряжения на вторичной обмотке повышающего трансформатора.

Графики показывают, что режим работы

магнетрона существенно зависит от величины сетевого напряжения. Отклонения сетевого напряжения даже в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения могут привести либо к аварийной ситуации из-за перегрузки магнетрона, либо к существенному уменьшению его выходной мощности. Поэтому система электропитания магнетрона должна быть оснащена стабилизатором напряжения.

Таблица 1 – Параметры блока *Transformer*

Параметр	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	В·А	3200
Частота	Гц	50
Параметры первичной обмотки		
Номинальное напряжение	В	220
Индуктивность рассеяния	Гн	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление обмотки	Ом	0,6
Параметры вторичной обмотки		
Номинальное напряжение	В	3100...3500
Индуктивность рассеяния	Гн	1,3
Сопротивление обмотки	Ом	135
Параметры цепи намагничивания		
Индуктивность	Гн	8
Сопротивление	Ом	$1 \cdot 10^4$

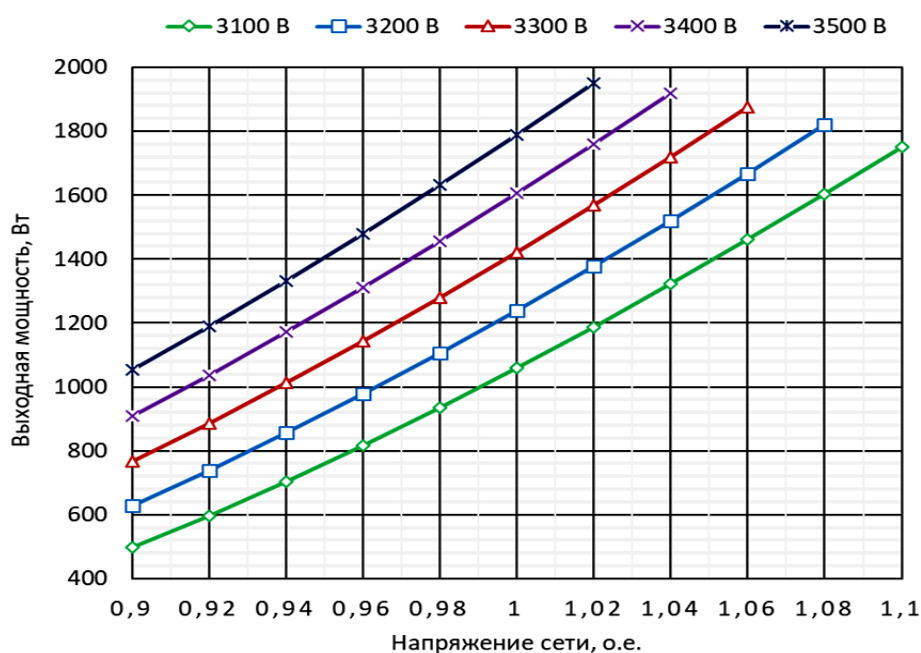


Рис. 7. Зависимость выходной мощности магнетронного генератора от напряжения сети

Разработанная модель позволяет также исследовать влияние несимметрии напряжений сети на работу СВЧ-установки. В табл. 2 приведены результаты расчета для ситуации, когда на одной из фаз напряжение имеет номинальное значение, а на двух других фазах напряжения отличаются на +2 % и –2 % от номинального значения. Результаты моделирования показывают, что из-за несимметрии напряжений мощность СВЧ-генератора, подключенного к фазе В, увеличилась на 9,2 % относительно мощности генератора, работа-

ющего от фазы А. При этом мощность генератора, получающего питание от фазы С, уменьшилась на 11,5 %.

Возможный вариант решения проблемы влияния колебаний сетевого напряжения на работу магнетронного генератора предполагает использование тиристорного регулятора напряжения с импульсно-фазовой системой управления. Однако проведенные исследования показали, что применение данной схемы имеет ряд существенных недостатков [7].

Таблица 2 – Влияние несимметрии напряжений

Фаза	Фазное напряжение, В	Линейный ток, А	Выходная мощность, Вт
А	220,4	18,14	1741
В	224,5	19,53	1901
С	216,4	16,82	1501

Магнетронные генераторы в количестве, кратном трем, представляют собой равномерную нагрузку для питающей сети. Однако фазные токи i_A , i_B , i_C имеют несинусоидальную форму. Основной вклад в искажение формы токов вносит третья гармоника.

Из-за того, что фазные токи имеют в своем составе третью и кратную ей гармоники, по нулевому проводу протекает ток, величина которого соизмерима с фазными токами. При этом ток нулевого провода имеет частоту 150 Гц.

Наличие тока в нулевом проводе является существенным недостатком схемы, показанной на рис. 2. Особенно он проявляется в том случае, когда электроснабжение СВЧ-установки осуществляется от дизель-генератора (ДГ). Дело в том, что ДГ оснащают защитой от несимметрии фазных токов, принцип действия которой предполагает включение реле в нулевой провод. В инструкциях по эксплуатации ДГ указывают, что несимметрия токов нагрузки не должна превышать 20-25 % номинального тока [8].

Если ДГ работает на электроприемники с линейными ВАХ, то при симметричной нагрузке фаз ток нулевого провода

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0.$$

При возникновении несимметричного режима $i_N \neq 0$ (при определенном значении тока нулевого провода) срабатывает реле, которое выключает ДГ.

При работе ДГ на нагрузку, фазные токи которых содержат третью и кратные ей гармоники, по нулевому проводу всегда протекает ток. Для рассматриваемой схемы величина этого тока зависит от выходного напряжения ДГ и угла управления α . Поэтому после включения СВЧ-установки

и вывода ее на рабочий режим в некоторый момент обязательно будет происходить срабатывание защиты и отключение ДГ.

Отметим еще один недостаток схемы электропитания магнетронных генераторов с применением регулятора напряжения в виде встречно-параллельно соединенных тиристоров с импульсно-фазовым управлением. Такой регулятор позволяет изменять среднеквадратичное значение напряжения в широком диапазоне угла управления α . Это свойство является полезным для электротермических установок резистивного нагрева, так как мощность этих установок при заданном сопротивлении нагревательных элементов зависит от квадрата действующего напряжения. Однако в системе электропитания магнетрона импульсно-фазовое регулирование напряжения не приводит к требуемому эффекту. Это объясняется тем, что магнетрон входит в режим генерации СВЧ-колебаний только после того, как напряжение между анодом и катодом магнетрона превышает пороговое значение U_0 . Поэтому изменение угла управления α тиристорами в диапазоне от 0 до некоторого значения, которое зависит от величины питающего напряжения, не приводит к изменению тока магнетрона и соответствующему изменению его выходной мощности.

Выводы

Параметры питающей сети оказывают существенное влияние на режим работы магнетронных генераторов. Отклонения сетевого напряжения даже в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения могут привести либо к аварийной ситуации из-за перегрузки магнетрона, либо к существенному уменьшению его выходной мощности.

Применение тиристорных регуляторов напряжения позволяет частично решить

проблему, однако это решение имеет много недостатков, в том числе негативное влияние на питающую сеть и узкий диапазон регулирования выходной мощности магнетронных генераторов.

Требуется разработка радикальных решений, которые позволили бы обеспечить устойчивую работу магнетронных генераторов

в составе конвейерных СВЧ-установок в условиях изменения параметров питающей сети. Одно из направлений решения проблемы может состоять в применении централизованных систем электропитания магнетронных генераторов с регуляторами анодного тока в виде вольтодобавочных устройств [9].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Okress E.** Microwave Power Engineering. Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.

2. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко, В. Требух, И. Воробьев // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2010. № 3. С. 2-6.

3. Novel foodstuff conveyor belts compound for energy saving: the effect of microwave pre-heating and mixed fillerson mechanical properties / S. Limhengha, S. Limnararat, I. Jangchud, W. Sriseubsai // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. Vol. 12. № 4. P. 1105-1110.

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

5. TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164. URL: [http:// www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf](http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf).

6. **Артюхов И.И., Сошинов А.Г., Бочкарева И.И.** Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии. Волгоград: ИУНЛ ВолГТУ, 2015. 124 с.

7. **Артюхов И.И., Пыльская Е.К., Земцов А.И.** Мультигенераторная установка конвейерного типа с электропитанием от автономного источника энергии // *Вопросы электротехнологии*. 2022. № 1 (34). С. 75-84.

8. Analysis of Operation of Synchronous Generator under the Distortion of Harmonic Current / J.-q. Wang, P.-c. Song, C.-h. Cui, J.-k. Li, T. Yang // 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2012. DOI: 10.1109/APPEEC.2012.6307699.

9. **Zemtsov A.I., Artyukhov I.I.** Power Supply System for Industrial Packaged Magnetrons Group // 29th International Conference Radioelektronika – Microwave and Radio Electronics Week, MAREW 2019. (Pardubice, Czech Republic, 16 – 18 April 2019). DOI: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733579.

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Николаев Михаил Денисович – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan I. Artyukhov – Dr. Sci., Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Mikhail D. Nikolaev – Master's student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.02.24, принята к опубликованию 14.03.24.

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

МИРОНОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ **(1937–2023)**

**доктор технических наук, почётный академик АЭН РФ,
Заслуженный работник высшей школы РФ,
Заслуженный деятель науки ЧАССР,
Заслуженный профессор Чувашского государственного университета
имени И.Н. Ульянова (ЧГУ)**



16 августа 2023 года после тяжелой болезни ушел из жизни профессор, доктор технических наук, почётный академик АЭН РФ, Заслуженный работник высшей школы РФ, Заслуженный деятель науки ЧАССР, Заслуженный профессор Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова (ЧГУ) Юрий Михайлович Миронов.

Юрий Михайлович Миронов родился 15 мая 1937 г. в г. Москве. В 1960 г. он окончил Московский энергетический ин-

ститут (МЭИ) по специальности инженер-электрик и начал трудовую деятельность на заводе «Электросталь» в Московской области.

В 1966 году после окончания аспирантуры МЭИ и защиты кандидатской диссертации Юрий Михайлович был приглашен в Волжский филиал МЭИ (г. Чебоксары), на основе которого создан ЧГУ, и возглавил кафедру ТОЭ, а в 1968 году он создал кафедру автоматизированных электротехнологических установок и систем (АЭТУС),

которой руководил 43 года. В 1977 г. Юрий Михайлович защитил докторскую диссертацию.

С 2011 г. Юрий Михайлович продолжил научно-педагогическую деятельность в должности профессора кафедры АЭТУС. Он был членом диссертационных Советов ЧГУ, а также Новосибирского и Саратовского государственных технических университетов.

Профессор Ю. М. Миронов – видный ученый, имевший международное признание. Основное направление научной деятельности – разработка и исследование процессов, режимов и проблем управления электродными электропечами (электрошлаковыми, дуговыми, рудовосстановительными). Под его руководством проведен ряд фундаментальных исследований электрической дуги и закономерностей распределения энергии по ваннам печей резистивного и смешанного нагрева, ставших основой методов оптимизации режимов работы этих электропечей.

Разработки Ю.М. Миронова защищены 35 авторскими свидетельствами СССР, 2 патентами РФ и 18 патентами иностранных государств: США, Англии, Швеции, Австрии, Японии, Германии. Он является автором более 350 научных трудов, из которых 5 монографий, 3 учебника для вузов, 9 учебных пособий, более 270 статей.

Ю.М. Миронов подготовил 16 кандидатов и 1 доктора технических наук, под его руководством в ЧГУ подготовлено более 1250 инженеров и магистров, среди которых руководители и ведущие специалисты различных предприятий и научных организаций России и СНГ.

Академик АЭН РФ, Президент АЭН ЧР,
Директор по науке АО «ВНИИР»,
заведующий кафедрой ТОЭ и РЗА ЧГУ,
к.т.н., проф.

Заведующий кафедрой ЭЭиАП ЧГУ,
к.т.н., доцент

Профессор Миронов Ю.М. выступал с докладами на международных, всесоюзных и всероссийских конгрессах и конференциях, а также был членом их научных и организационных комитетов. В 1969-1991 гг. он являлся членом Советского Национального комитета Международного союза по электротехнологии.

Следует отметить большой вклад Юрия Михайловича в развитие Чувашского госуниверситета, а также его заслуги в укреплении связи промышленности с наукой. В 1969-1991 годах член Научно-технического Совета Минвуза СССР. С 1971 по 1991 годы являлся членом Президиума Научно-методического совета по электротермической технике Минвуза СССР, членом Головного Научно-методического совета по электротехнике и энергетике Минобразования РФ, был организатором и президентом АЭН ЧР с 1997 по 2014 г. Он награжден 3 медалями СССР, медалью ордена «За заслуги перед Чувашией» и рядом отраслевых наград.

Юрий Михайлович был многогранным человеком – вдохновленным ученым, лидером и учителем, мудрым и душевным человеком, любящим мужем и отцом. Семья двух докторов технических наук – Юрия Михайловича и Альвины Николаевны Мироновых отметила 63 годовщину супружества.

С теми, кто его знал, учился у него и работал бок о бок, он навсегда останется в памяти как человек, влюбленный в свое дело, талантливый, принципиальный и настойчивый в достижении поставленной цели.

Г.С. Нудельман

А.Г. Калинин

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефону:

8 (8452) 99-87-64 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/134, главному редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Артюхову И.И. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

- Рукопись статьи оформляется в программе Microsoft Word для Windows
 - Формат страницы – А4, ориентация книжная
 - Размеры полей страниц: верхнее и нижнее – по 25 мм, левое и правое – по 20 мм
 - Абзацный отступ – 0,63 см
 - Шрифт текста рукописи – Times New Roman, размер 12 pt
 - Междустрочный интервал – 1,0
 - Общий объем рукописи (включая иллюстрации и таблицы) – не более 10 страниц.
- Указанное ограничение объема рукописи не распространяется на сведения об авторах.

Иллюстрации (рисунки, графики, фотографии) располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Чертежи, схемы и другие графические материалы выполняются с хорошей проработкой деталей в программах Corel Draw (с расширением *.cdr) или других редакторах (с расширением *.jpeg или *.tiff). Все графические материалы должны быть доступны для редактирования, поэтому необходимо представлять их в исходном формате. Цветные иллюстрации должны быть адаптированы для черно-белой печатной версии журнала. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ Р 7.0.5-2008 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 25.03.2024 Дата выхода в свет 29.03.2024

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 12,25 Уч. изд. л. 5,6

Тираж 500 экз. Заказ 6 Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: izdat@sstu.ru

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2024 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621*
выдано Роскомнадзором от 01.07.2013

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address of the editorial office:
77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 25.03.2024 Date of publication: 29.03.2024

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 12,25 Publication base sheet 5,6

Circulation: 500 printed copies. Order 6 Subscription and individual copies: open rates

Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.

Online at www.eLIBRARY.RU

The certificate of media source registration: PI No. *FS77-54621*

Issued by Roscomnadzor 01.07.2013

