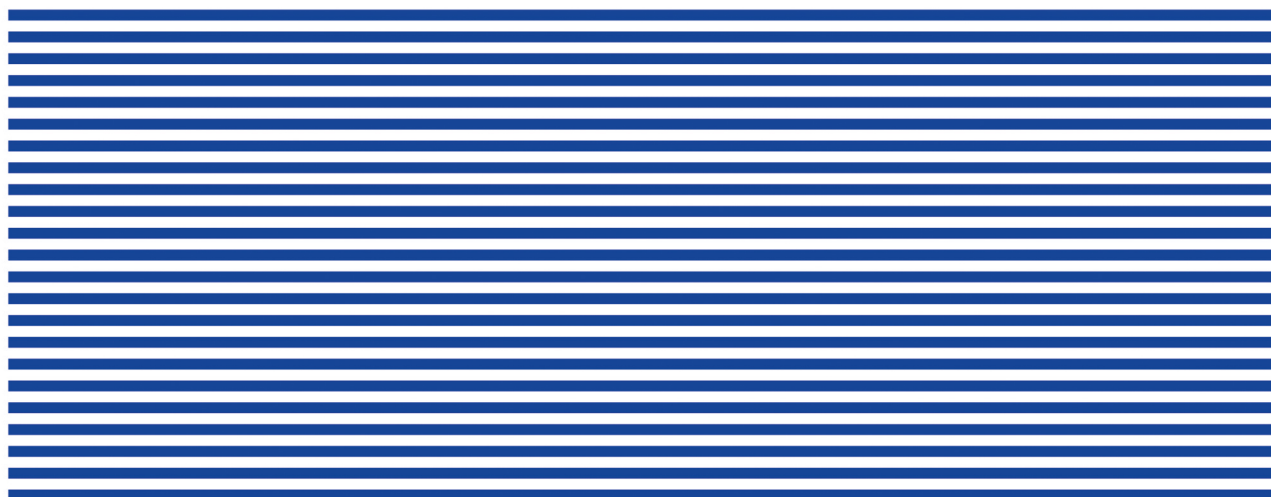




ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



2023

№ 1 (38)



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
- 2.2.11. Measuring Instruments and Methods
- 2.2.11. Information-Measuring and Control Systems

Издаётся с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (38)
Март 2023

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

В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
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
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
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., 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 (38)
March 2023

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

V.V. VAKHNINA

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

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

L.S. ZIMIN

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

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., 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

**Данилушкин А.И., Данилушкин В.А.,
Колпаков Д.В.** Исследование нестационарных режимов методического индукционного нагревателя в линиях деформации..... 5

Тригорлый С.В., Чудров А.А. Моделирование СВЧ-размораживания грунта.....14

Тригорлый С.В., Желнов В.Е. Компьютерное моделирование СВЧ электротехнологических установок с волноводно-щелевыми излучающими системами.....21

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**Абакумов А.М., Горячкин А.А.,
Рандин Д.Г.** Исследование системы стабилизации поперечной устойчивости автомобиля с электромеханической активной подвеской.....29

**Завьялов В.М., Гайдук С.В.,
Абейдулин С.А., Углова М.Б.** Анализ влияния параметров резонансного контура на КПД системы беспроводной передачи энергии37

Максимов С.П., Кузнецов П.А. Анализ существующих методов плавки гололедно-изморозевых отложений на проводах ВЛ-10(6) кВ..... 47

**Подгорный А.С., Николаев П.А.,
Козловский В.Н.** Разработка инструментов оценки электромагнитной поражаемости электротехнических систем легковых автомобилей 57

Саксонов А.С., Козловский В.Н. Реализация вероятностно-статистического инструментария оценки влияния вариабельности технологического процесса производства автомобильных генераторов на стабильность его основных электротехнических характеристик..... 61

**Рожнов И.Ю., Гайнуллин Ш.А.,
Артюхов И.И.** Уменьшение негативного влияния преобразователя частоты на синхронный генератор с изменяемой скоростью вращения ротора.....68

**Стариков А.В., Беляева О.С.,
Пудовкина Д.А.** Влияние величины «мертвого» времени на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя 75

К сведению авторов 83

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Kolpakov D.V. Investigation of non-stationary modes of the methodological induction heater in strain lines.....	5
Trigorly S.V., Chudrov A.A. Modeling of microwave soil defrosting	14
Trigorly S.V., Zhelnov V.E. Computer simulation of microwave electrical installations with slotted waveguide radiation systems.....	21

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Abakumov A.M., Goryachkin A.A., Randin D.G. Investigation of the trans- verse stability system of a vehicle with electromechanical active suspension	29
Zavyalov V.M., Gaiduk S.V., Abeidulin S.A., Uglova M.B. Analysis of the influence of resonant circuit parameters on the efficiency of a wireless power transmission system	37

Maksimov S.P., Kuznetsov P.A. Existing methods for melting ice and snow accretion on 10(6) kV power lines.....	47
Podgorny A.S., Nikolaev P.A., Kozlovsky V.N. Development of tools to assess electromagnetic interference in electrical systems of motor vehicles.....	57
Saxonov A.S., Kozlovsky V.N. Probabilistic and statistical methods for estimating variability effects of technological processes in the production of automotive alternators on stability of its basic electrical characteristics.....	61
Rozhnov I.Yu., Gainullin Sh.A., Artyukhov I.I. Mitigation of the negative impact of the frequency converter on the variable speed synchronous generator.....	68
Starikov A.V., Belyaeva O.S., Pudovkina D.A. Influence of the «dead» time on harmonic composition of the output voltage of the frequency converter	75
Information for Authors	83

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.365

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ МЕТОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ В ЛИНИЯХ ДЕФОРМАЦИИ

А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин, Д.В. Колпаков

INVESTIGATION OF NON-STATIONARY MODES OF THE METHODOLOGICAL INDUCTION HEATER IN STRAIN LINES

A.I. Danilushkin, V.A. Danilushkin, D.V. Kolpakov

В статье рассматривается проблема управления двухсекционным методическим нагревателем в режимах пуска с различным температурным распределением загрузки по длине нагревателя. Особенностью функционирования нагревателя является существенное изменение физических свойств нагреваемого металла, обусловленное их зависимостью от температуры. Для разработки и анализа алгоритмов изменения мощности в процессе выхода на установившийся режим используется математическая модель объекта, которая учитывает нелинейную зависимость физических свойств металла от температуры. С учетом приведенных в работе уточнений выполнен расчет электромагнитных источников тепла и температурного распределения в загрузке в процессе выхода на установившийся режим работы. Показано, что в процессе пуска нагревателя происходит значительное изменение температурного распределения по длине загрузки. Отклонение температурного распределения от стационарного режима приводит к появлению некондиционных заготовок на выходе. Получены алгоритмы изменения мощности, обеспечивающие быстрый выход на установившийся режим с заданным температурным распределением при минимальных потерях энергии на нагрев не-

The article deals with the problem of control over a two-section methodical heater in start-up modes with various temperature distributions of the load along the length of the heater. A key feature of the heater performance is a significant change in the physical properties of the heated metal, due to their dependence on the temperature parameters. A mathematical model of an object, which takes into account a nonlinear dependence of the physical properties of metals on the temperature parameters is used to develop and analyze the algorithms for tracking the changes of power during the steady-state operation. Taking into account the clarifications given in the work, calculation of electromagnetic heat sources and temperature distribution in the load is performed in the process of steady-state operation mode. It is shown that during the heater start-up, a significant change in the temperature distribution along the length of the load is observed. Deviation of temperature distribution from the stationary mode leads to appearance of substandard workpieces at the outlet. The obtained algorithms for changing the power can provide a quick exit to a steady-state mode with a specified temperature distribution at minimal energy losses needed for heating substandard workpieces. Calculation of control parameters is made with account to the limiting capabilities of autonomous power

кондиционных заготовок. Расчет параметров управления выполнен с учетом предельных возможностей автономных источников питания. Рассмотрены варианты алгоритмов управления режимами пуска с учетом различных начальных распределений температуры по длине загрузки. Анализ показывает, что полученные алгоритмы управления нестационарными режимами обеспечивают одновременно минимум энергозатрат при выходе на установившийся режим и максимальное быстроедействие.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическая модель, источники тепла, температурное распределение, управление, эффективность

Введение

Индукционные установки для нагрева под обработку на деформирующем оборудовании являются частью технологического комплекса, поэтому режим их работы должен быть строго согласован с режимом работы деформирующего оборудования. В большинстве случаев индукционный нагреватель является сдерживающим фактором в технологической линии обработки металла. В связи с этим повышение эффективности работы нагревательной установки имеет важное значение для снижения простоев деформирующего оборудования [1]. В процессе работы технологической линии «индукционный нагреватель – обработка давлением» в течение рабочей смены происходит от трех до пяти плановых остановок оборудования различной длительности. В зависимости от длительности остановки индукционный нагреватель отключают от источника питания или переводят в режим термостатирования.

Существующая практика пуска нагревателя заключается в одновременной подаче напряжения на обе секции нагревателя и включения привода перемещения заготовок через нагреватель. При таком способе пуска первая нагретая до заданной температуры заготовка выходит из нагревателя только после того, как весь столб заготовок, находящийся в нагревателе в момент

пуска, выйдет из нагревателя. Это приводит к непроизводительным потерям на нагрев некондиционных заготовок и простою деформирующего оборудования. Таким образом, встает задача поиска алгоритма управления процессом пуска нагревателя методического действия, обеспечивающего минимум суммарных потерь. Поставленная задача существенно усложняется для многосекционного нагревателя с автономным источником питания для каждой секции. Поиск оптимальных алгоритмов управления при пуске сопровождается целым рядом условий и ограничений, наложенных на управляющие воздействия, предельную температуру нагрева, перепад температуры по объему нагреваемых заготовок.

Keywords: induction heating, mathematical model, heat sources, temperature distribution, control, efficiency

пуска, выйдет из нагревателя. Это приводит к непроизводительным потерям на нагрев некондиционных заготовок и простою деформирующего оборудования. Таким образом, встает задача поиска алгоритма управления процессом пуска нагревателя методического действия, обеспечивающего минимум суммарных потерь. Поставленная задача существенно усложняется для многосекционного нагревателя с автономным источником питания для каждой секции. Поиск оптимальных алгоритмов управления при пуске сопровождается целым рядом условий и ограничений, наложенных на управляющие воздействия, предельную температуру нагрева, перепад температуры по объему нагреваемых заготовок.

Соппротивление системы «индуктор – металл» в процессе пуска существенно отличается от сопротивления в установившемся режиме. В процессе пуска мощность, подводимая к каждой секции индуктора, может отличаться от мощности в установившемся режиме на 35÷40 %. Следствием этого является вероятный выход источника питания на ограничение по мощности, что неизбежно приводит к выдаче некондиционных заготовок, непроизводительным затратам энергии на их нагрев и к простою деформирующего оборудования. Кроме того, в процессе пуска происходит непрерывное изменение распределения мощности внутренних источников

тепла как во времени, так и по пространственной координате объекта. Это отражается на температурном распределении по объему заготовок, существенно отличающемся от температурного распределения в установившемся режиме. В настоящей работе рассматривается одна частная задача поиска такого алгоритма управления пуском двухсекционного нагревателя, который обеспечивает заданное температурное распределение на выходе из нагревателя с минимальными потерями темпа и минималь-

ными затратами энергии на нагрев некондиционных заготовок.

Основная часть

Исследуемый объект включает две автономные секции, каждая из которых подключается к регулируемому источнику питания. В каждой секции находится от трех до пяти заготовок. Температура заготовки на выходе из нагревателя составляет $1150 \div 1250$ град. Параметры нагреваемых заготовок приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры нагреваемых заготовок

Материал заготовки	Диаметр D , мм	Длина L , мм	Масса m , кг
Ст19ХГНМА Ст17Н3МА	$120 \div 180$	$200 \div 430$	$30 \div 85$

Интервал выдачи заготовок под обработку определяется темпом работы деформирующего оборудования и составляет $140 \div 160$ с. При такой дискретности перемещения заготовок температурное распре-

деление столба заготовок имеет вид ступенчатой функции (рис. 1). Полное время нахождения заготовки в нагревателе составляет 1120 с.

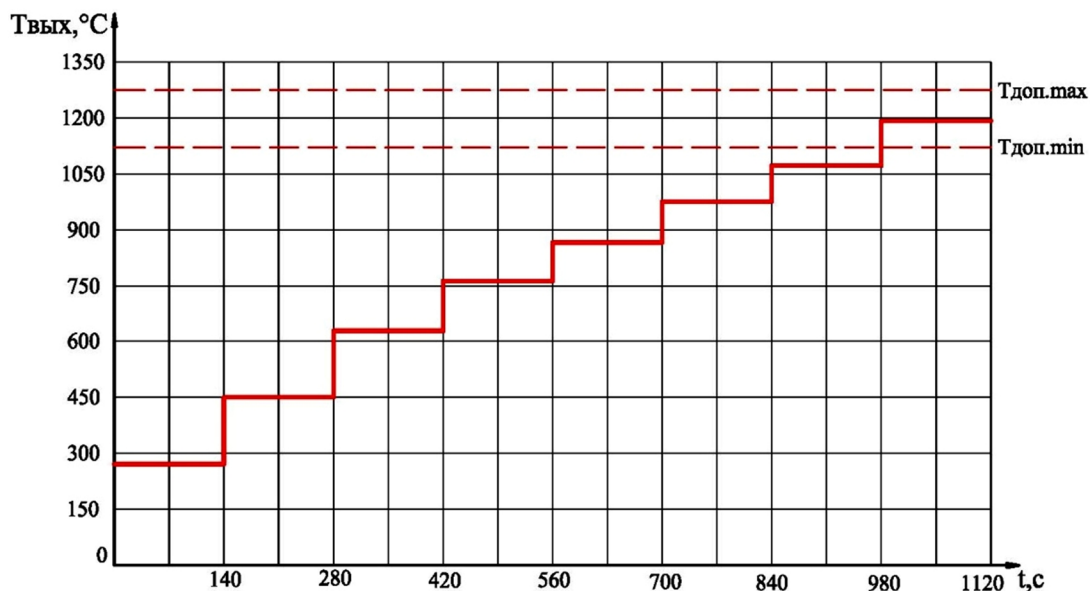


Рис. 1. График температуры в процессе прохождения заготовки через нагреватель

Перепад температуры смежных заготовок составляет $100 \div 150$ град. Особенностью расчёта алгоритмов управления двухсекционными индукционными нагревателями в переходных режимах является нестационарный характер зависимости электро- и тепло-

физических характеристик металла загрузки от температурного распределения.

Как следствие, это приводит к неравномерному распределению удельной мощности внутреннего тепловыделения по длине загрузки. Уровень мощности,

подводимой к каждой секции нагревателя, в переходных режимах также не остается постоянным. Используемые в большинстве работ математические модели не учитывают всех особенностей функционирования методических индукционных нагревателей в переходных режимах работы [2-6]. Для поиска оптимальных алгоритмов управления в нестационарных режимах необходимо использовать уточненную электротепловую модель, которая учитывает нелинейную нестационарную зависимость распределения мощности

внутренних источников тепла от температурного распределения в загрузке.

Основное требование при пуске нагревательной установки заключается в обеспечении минимальных потерь энергии при выходе на стационарных режим работы за минимальное время.

Постановка задачи оптимального управления индукционным нагревателем методического действия в переходных режимах работы формулируется следующим образом [7, 8].

Для объекта, описываемого уравнением

$$c(T)\gamma \frac{\partial T(r,x,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T)r \frac{\partial T(r,x,t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T(r,x,t)}{\partial x} \right] + \frac{1}{c(T)\gamma} P(r,x,t) \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} T(r,x,0) &= T(r,x); \quad T(r,0,t) = T(r); \\ T(R,x,t) &= \alpha [T(R,x,t) - T_{\phi}(x,t)] \end{aligned} \quad (2)$$

найти управляющую функцию $P(r,x,t)$, обеспечивающую выполнение соотношения

$$J = \int_0^{\infty} P(t) dt = J_{\min} \quad (3)$$

при наличии энергетических и технологических ограничений вида:

$$P_{\min} \leq P(t) \leq P_{\max}; \quad (4)$$

$$|T(r,L,t) - T_{\text{зад}}(r,L)| \leq \Delta T_{\text{дон}}. \quad (5)$$

Здесь T – температура; t – время; $\lambda(T)$ – удельная теплопроводность; $c(T)$ – удельная теплоемкость; γ – плотность нагреваемого металла; R – радиус цилиндра; L – длина нагревателя; $P(r,x,t)$ – удельная мощность внутренних источников тепла, α – коэффициент теплообмена; $P(t)$ – мощность, подводимая к индуктору.

Как показано в работе [7] задача на максимум точности (3) одновременно обеспечивает минимум времени выхода на установившийся режим.

Для рассматриваемого в работе процесса нагрева стальных ферромагнитных заготовок до температур пластиче-

ской деформации технологические ограничения конкретизируются следующим образом.

– допустимый перепад температуры по радиусу заготовки на этапе нагрева в области упругих деформаций (нагрев в первой секции) – $(T_{\text{нов}} - T_{\text{ц}})_I \leq 600^\circ\text{C}$;

– максимально допустимая температура в процессе нагрева не должна превышать $T_{\text{max}}(r,x,\tau_{\text{кон}}) \leq 1300^\circ\text{C}$;

– разность температур между наиболее нагретой точкой и центром заготовки на выходе – $(T_{\text{max}} - T_{\text{ц}}) = 150^\circ\text{C}$.

Темп выдачи нагретых до заданной температуры заготовок в установившемся режиме работы технологической линии обработки металла задается темпом работы деформирующего оборудования. Как было отмечено выше, производительность технологической линии обработки металла определяется предельными возможностями нагревательной установки. В связи с этим одной из задач переходного режима при пуске индукционного нагревателя наряду с минимизацией потерь энергии является минимальное время простоя деформирующего оборудования.

В связи с наличием многих нелинейностей аналитическое решение поставленной задачи не представляется возможным. В исследуемой двухсекционной ин-

дукционной нагревательной установке методического действия процесс моделирования электромагнитной и тепловой задач в переходном режиме происходит совместно и одновременно. Вначале производится расчет температурных полей в каждой заготовке первой секции нагревателя. В процессе расчета электрофизические характеристики металла изменяются в зависимости от температуры для каждой заготовки. После окончания итерационной процедуры расчета электромагнитных и тепловых полей в загрузке первой секции рассчитываются параметры нагрева для загрузки второй секции. Начальные условия для температурного распределения в загрузке второй секции определяются температурным распределением в загрузке первой секции нагревателя.

Математическая модель электромагнитных процессов в устройствах индукционного нагрева при нагреве цилиндрических заготовок формулируется без существенных погрешностей с учетом следующих допущений [9]:

1. Рассматривается двумерная осесимметричная область ($r - 0 - x$), где индукция $\vec{B}$ и напряженность $\vec{H}$ магнитного поля определяются двумя составляющими в координатах (r, x).

2. Поле считается квазистационарным. Токи смещения отсутствуют.

3. Потери на гистерезис не учитывают.

Принятые допущения позволяют упростить решение рассматриваемой задачи.

Для расчета задаются:

- уравнения поверхностей, отделяющих друг от друга среды i и j , $f_{ij}(x, y, z) = 0$;

- начальные значения напряженностей $E_0(x, y, z)$, $H_0(x, y, z)$ в момент времени t_0 в произвольной точке исследуемого объема $V \subset R^3$ с границей S ;

- касательные составляющие вектора $\vec{E}$ или $\vec{H}$ в произвольной точке поверхности в произвольном временном интервале от t_0 до t , или распределения полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$ вне исследуемого объема V ;

- функциональные зависимости параметров ε , μ , γ от координат пространства

или от напряженности соответствующего поля.

Задача поиска оптимального алгоритма управления в переходных режимах пуска решается численным методом в программном комплексе ELCUT [10].

Результаты расчета электромагнитной задачи в виде внутренних источников тепла используются далее при решении тепловой задачи расчета температурного распределения по радиальной и аксиальной координатам заготовки на каждой позиции.

Наиболее распространенными вариантами начальных условий при пуске являются: пуск нагревателя с «холодной» загрузкой; пуск из режима термостатирования; пуск после кратковременных остановок. Задача расчета оптимальных алгоритмов управления решается итерационно путем сравнительного анализа различных вариантов. Такая постановка приводит к необходимости решения поисковой задачи.

Для определения оптимального по критерию минимума энергозатрат пуска нагревателя рассмотрены два режима: пуск из «холодного» состояния загрузки и пуск из режима «термостатирования».

Из физических соображений и используя опыт ряда авторов по управлению переходными режимами односекционных нагревателей [11-14], алгоритм управления напряжением двухсекционного нагревателя принимает вид ступенчатой функции:

Для первой секции, содержащей три заготовки:

$$U_1(t) = \begin{cases} U_{11}(t), \forall t \in (0, t_{11}) \\ U_{12}(t), \forall t \in (t_{11}, t_{12}) \\ U_{13}, \forall t \in (t_{12}, t_{1\text{кон}}) \end{cases} \quad (6)$$

Здесь U_{11} – напряжение, подводимое к индуктору первой секции на первом интервале управления $(0; t_1)$; U_{12} – напряжение, подводимое к индуктору на втором интервале управления (t_1, t_2) ; U_{13} – напряжение, подводимое к индуктору на третьем интервале $(t_2, t_{\text{кон}})$.

Для второй секции, содержащей шесть заготовок:

$$U_2(t) = \begin{cases} U_{21}, & \forall t \in (0, t_{21}) \\ U_{22}(t), & \forall t \in (t_{21}, t_{22}) \\ \\ U_{2n}, & \forall t \in (t_{2n}, t_{2\text{кон}}) \end{cases}. \quad (7)$$

В переходных режимах при «холодном» пуске в начальный момент все заготовки ферромагнитные, поэтому сопротивление системы «индуктор – металл» значительно меньше, чем в установившемся режиме, когда часть заготовок в нагревателе становится немагнитной. При этом мощность преобразователя частоты может быть меньше, чем требуемая мощность индуктора. Следовательно, алгоритм управления должен быть рассчитан с учетом энергетического ограничения на мощность источника питания.

На рис. 2 приведены алгоритмы изменения активной мощности, электрического ко-

эffiциента полезного действия и коэффициента мощности второй секции нагревателя.

Мощность, которую необходимо подвести к индуктору второй секции при пуске на первых трех интервалах управления значительно больше, чем мощность в установившемся режиме. В некоторых случаях она может превышать предельные возможности преобразователя частоты. В связи с этим в данном режиме пуска в течение первых трех интервалов напряжение источника питания необходимо уменьшить исходя из условия ограничения тока нагревателя на уровне предельно допустимого тока источника питания. На графике 1 (рис. 2) это соответствует участку на временном интервале $0 \div 420$ с. Нелинейный характер изменения мощности при постоянстве напряжения на индукторе в пределах каждого интервала объясняется вариацией сопротивления нагревателя в процессе нагрева.

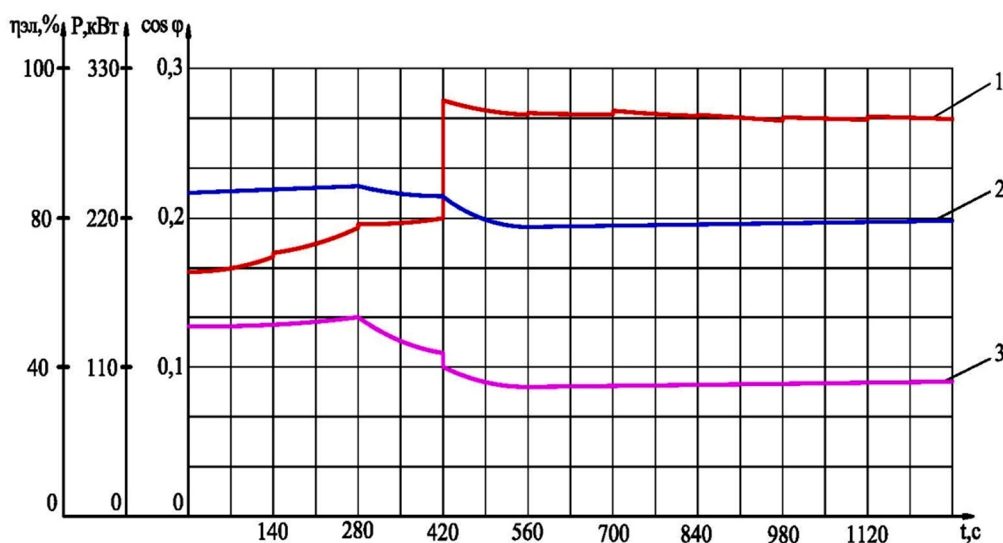


Рис. 2. Энергетические характеристики второй секции в процессе «холодного» пуска:

1 – активная мощность, кВт; 2 – электрический коэффициент полезного действия; 3 – $\cos \varphi$

Вторая наиболее часто встречающаяся ситуация – пуск из режима термостатирования. Начальное температурное распределение в загрузке по длине нагревателя близко к равномерному. Общий вид алгоритма управления двухсекционным нагревателем принципиально совпадает с алгоритмами (6) и (7). Отличие заключается в уровне напряжения и характере измене-

ния энергетических характеристик в процессе пуска.

На рис. 3 приведены алгоритмы изменения напряжения в процессе пуска из режима термостатирования, в первой и во второй секциях, на рис. 4 – графики изменения мощности, электрического коэффициента полезного действия и коэффициента мощности второй секции нагревателя.

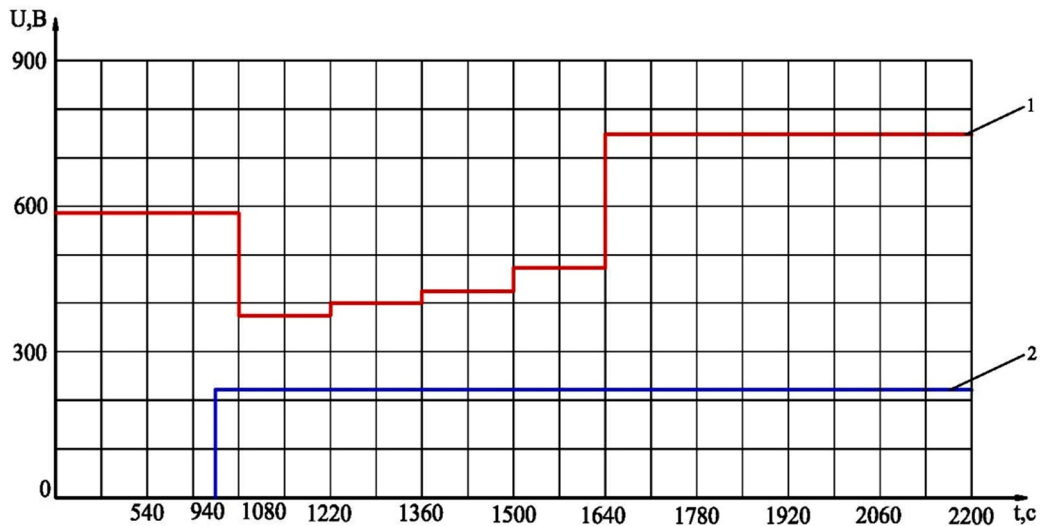


Рис. 3. Алгоритм изменения напряжения нагревателя при пуске из режима термостатирования: 1 – 2-я секция; 2 – 1-я секция

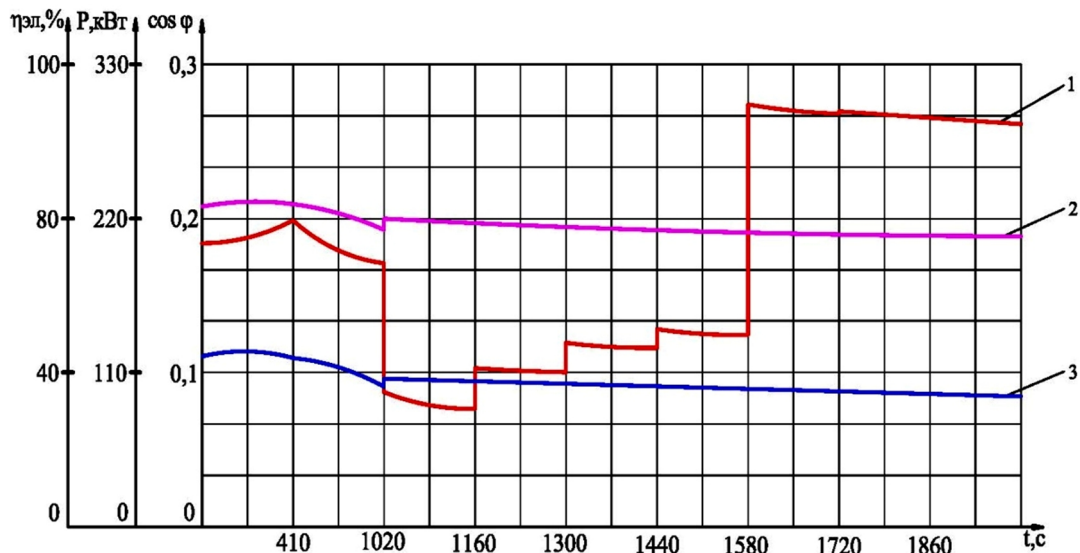


Рис. 4. Энергетические характеристики второй секции нагревателя при пуске:
1 – активная мощность, подведенная к индуктору P , кВт;
2 – электрический КПД индуктора $\eta_{эл}, \%$; 3 – $\cos \phi$ индуктора

Расчеты показывают, что параметры первой секции нагревателя в процессе пуска изменяются незначительно, только в конце третьего интервала $\cos \phi$ и $\eta_{эл}$ уменьшаются, и, как следствие, увеличиваются полная мощность и ток индуктора, хотя доля активной мощности уменьшается. Увеличение мощности индуктора первой секции в пусковом режиме по сравнению с установившимся режимом составляет не более 8 %, т.е. находится в пределах допустимой перегрузочной способности источника питания. Следовательно, для первой секции нагрева-

теля нет необходимости использовать специальный алгоритм изменения напряжения в процессе пуска, достаточно согласовать момент подачи напряжения на неё с началом второго интервала управления второй секцией нагревателя.

На рис. 5 приведен график температуры в загрузке на выходе из нагревателя. Полученный алгоритм управления пуском нагревателя позволяет сократить число некондиционных заготовок до трех и уменьшить простой деформирующего оборудования до минимума.

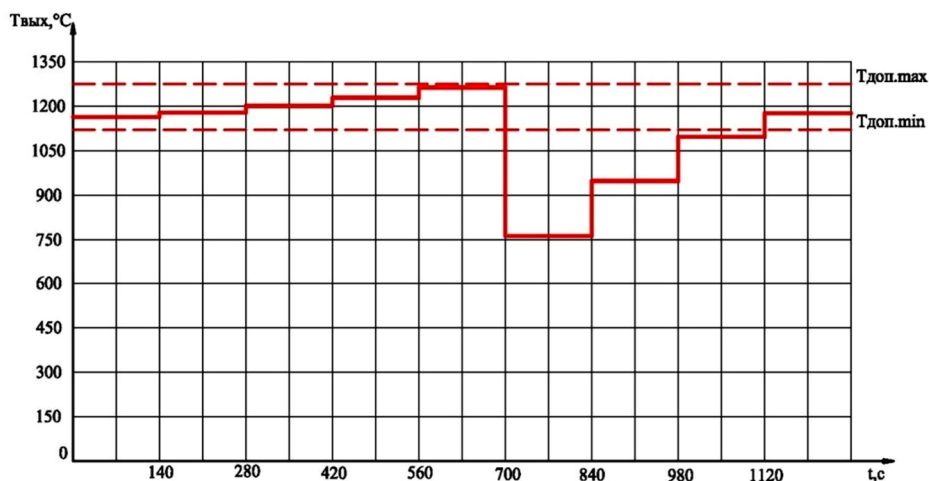


Рис. 5. Температура загрузки на выходе из нагревателя при пуске из режима термостатирования

Заключение

Анализ рассмотренных в работе вариантов позволяет сделать следующие выводы. Оптимальный алгоритм управления пусковыми режимами зависит от начального состояния загрузки. Для частных критериев быстродействия, точности, минимума энергозатрат алгоритм управления напряжением каждой секции имеет вид кусочно-постоянной функции с выходом на установившийся режим, причем, мощность, подводимая к первой секции, всегда принимает максимальное значение, ограниченное лишь допустимым перепадом температур между центром и поверхностью заготовки. Число интервалов постоянства напряжения второй секции нагревателя соответствует количеству находящихся в ней заготовок.

Следует отметить, что электрические параметры системы «индуктор–металл» в процессе пуска при любом начальном состоянии загрузки изменяются в широких пределах, что может привести к снижению коэффициента мощности и перегрузке источников питания по току. В большей степени этот эффект сказывается на характеристиках второй секции нагревателя. Для уменьшения этого негативного явления необходимо обеспечить в процессе пуска постоянное значение коэффициента мощности нагрузки за счет введения в силовую цепь нагревателя дополнительного оборудования в виде регулируемой части компенсирующей ёмкости с коммутационной аппаратурой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Афиногентов А.А., Деревянов М.Ю. Эффективные стратегии функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2015. № 3. С. 162-167.
2. Князев С.В. Энергоэффективные алгоритмы функционирования установок индукционного нагрева в линии раскатки подшипниковых колец // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 6 (8). Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2011. С. 181-185.
3. Осипова Ю.А., Рапопорт Э.Я. Оптимизация режимов смены производительности и номенклатуры индукционной нагревательной установки методического действия по критерию суммарной потери темпа выдачи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2007. Вып. 42. С. 166-170.
4. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А. Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве // Индукционный нагрев. 2013. Вып. 2 (24). С. 15-17.

5. **Афиногентов А.А., Каримова А.Т., Плешивцева Ю.Э.** Оптимизация процесса обработки заготовок цилиндрической формы в технологическом комплексе «нагрев – прессование» // Математическое моделирование и краевые задачи: труды Всерос. конф. Самара: СамГТУ, 2006. Ч. 2. С. 28-31.

6. **Данилушкин А.И., Плешивцева Ю.Э.** Оптимизация переходных режимов работы объектов технологической теплофизики с дискретно-распределенными управляющими воздействиями // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды пятой Междунар. конф.; под ред. акад. В.П. Мясникова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. Самара: Самарский научный центр РАН, 2003. С. 155-162.

7. **Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.** Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла: монография. Москва: Наука, 2012. Москва: Наука, 2012. 219 с.

8. **Рапопорт Э.Я.** Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. Москва: Высшая школа, 2009. 677 с.

9. **Немков В.С., Демидович В.Б.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. 280 с.

10. **ELCUT.** Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: руководство пользователя. Версия 5.9. Санкт-

Петербург: Производственный кооператив TOP, 2009.

11. **Афиногентов А.А., Дервянов М.Ю.** Эффективные стратегии функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2015. № 3. С. 162-167.

12. **Rapoport E.Y.** Analytical construction of aggregated controllers in systems with distributed parameters // Journal of computer and systems sciences international. 2012. Vol. 51. № 3. P. 375-390. Импорт фактор журнала в Web of Science 0,191.

13. **Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А.** Комплексное моделирование и управление процессом непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2016. Вып. 2 (50). С. 128-139.

14. **Данилушкин А.И., Князев С.В., Никитина Е.А.** Оптимизация нестационарных режимов непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2010: сборник науч. трудов по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Т. 6. Технические науки. Одесса: Черноморье, 2010. С. 21-25.

Данилушкин Александр Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Данилушкин Василий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Колпаков Дмитрий Викторович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Aleksander I. Danilushkin – Dr.Sci. Tech., Professor, Department of Electricity Supply to Industrial Companies, Samara State Technical University, Russia

Vasiliy A. Danilushkin – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electricity Supply to Industrial Companies, Samara State Technical University, Russia

Dmitry V. Kolpakov – Postgraduate Student, Department of Electricity Supply to Industrial Companies, Samara State Technical University, Russia

Статья поступила в редакцию 08.02.23, принята к опубликованию 15.03.23

УДК 621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-РАЗМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТА**С.В. Тригорлый, А.А. Чудров****MODELING OF MICROWAVE SOIL DEFROSTING****S.V. Trigorly, A.A. Chudrov**

В статье представлены результаты математического моделирования при нагреве мерзлого слоя грунта с помощью СВЧ-антенн. В качестве излучающих систем использовались рупорные и волноводно-целевые системы, работающих на частоте 2,45 ГГц. Исследование проводилось с помощью численного моделирования процесса СВЧ-нагрева с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе COMSOL Multiphysics. В результате моделирования определены оптимальная скорость движения излучающей системы и мощность СВЧ-излучения, при которых обеспечивается заданная равномерность нагрева грунта.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, излучающая система, численное моделирование, скорость движения, мощность, равномерность нагрева

Размораживание грунта с целью проведения аварийно-восстановительных работ на объектах топливно-энергетического комплекса (силовых и линиях, линиях связи, трубопроводах различного назначения) является актуальной задачей в северных регионах, таких, например, как Республика Саха. Сложность жизнеобеспечения населения республики связана с морозной зимой и с большой территорией [1].

Существует множество технологий, основанных на различных принципах термического воздействия. Так, например, существует способ разморозки с помощью электрических термоматов, где в качестве греющего элемента выступает инфракрасная термопленка. К преимуществам приме-

The article presents the results of mathematical modeling for heating the frozen soil layer using microwave antennas. Horn and waveguide-slot systems operating at the frequency of 2.45 GHz were used as radiation systems. The research was conducted by numerical simulation of the microwave heating process using the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software package. As a result of the simulation, the optimal speed of the radiating system and the microwave radiation power were determined, which ensures a given uniformity of ground heating.

Keywords: microwave heating, radiating system, numerical simulation, motion speed, power, uniformity of heating

ния термоматов можно отнести простоту настройки и обслуживания, а также низкое энергопотребление. К недостаткам же такого метода следует отнести низкую скорость нагрева и небольшую глубину прогрева мерзлого грунта, а также необходимость обеспечения их электропитанием.

Еще один метод оттаивания мерзлого грунта основан на внедрении в землю стальных электродов. Электроды подключаются к источнику питания, благодаря чему в слоях грунта начинает протекать ток. Для увеличения эффективности разморозки грунт пропитывают соляным раствором для лучшей электропроводности и сверху застилается опилками. К преимуществам такого метода можно отнести простоту в из-

готовлении, возможность регулирования глубины прогрева за счет длины электродов. К недостаткам такого метода следует отнести возможность поражения электрическим током персонала, необходимость подготовительных работ, а также постоянный и тщательный контроль за безопасностью и режимом работы устройства.

В данной работе рассматривается технология размораживания грунта с применением СВЧ-нагрева [2-4]. Термообработка грунта с помощью СВЧ-воздействия имеет преимущества перед известными способами нагрева за счет возможности проникновения электромагнитной волны в обрабатываемый объект и интенсификации нагрева.

В качестве излучателей СВЧ-энергии используются рупорные излучатели с прямоугольным поперечным сечением рупора или волноводно-щелевые излучатели [2]. Такие излучатели относятся к камерам лу-

чевого типа, основным преимуществом которых является возможность наращивания числа излучателей, обработка объектов с большими поверхностями [3].

Целью данной работы является моделирование электродинамических и тепловых процессов при термообработке мерзлого слоя грунта с помощью рупорных и волноводно-щелевых систем СВЧ-излучения.

Компьютерное моделирование процессов при СВЧ-термообработке диэлектриков основано на решении системы уравнений электродинамики и тепломассопереноса [4]. Оптимизация конструкции СВЧ-установок и режимов термообработки может быть выполнена с применением средств численного моделирования, например, программного обеспечения COMSOL Multiphysics [5].

На рис. 1 представлена геометрическая модель СВЧ-установки для размораживания грунта с применением рупорного излучателя.

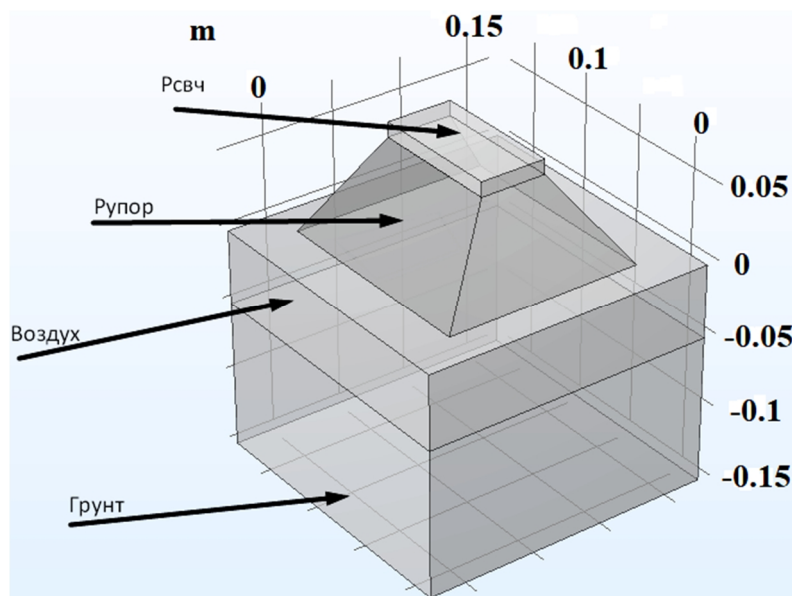


Рис. 1. Геометрическая модель пирамидального остроконечного рупора

Задача электродинамики волновых процессов в диэлектрических средах описывается уравнением Гельмгольца для вектора напряженности электрического поля E с соответствующими граничными условиями [6]. Дифференциальное уравнение теплопроводности для нестационарного режима нагрева с учетом известной скорости движения излучающей системы имеет вид

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_p \rho \cdot v \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = q_v. \quad (1)$$

Здесь c_p и ρ – удельная теплоемкость и плотность нагреваемого материала; T – температура; τ – время; v – вектор скорости движения излучающей системы относительно нагреваемого диэлектрика; λ – коэффициент теплопроводности; q_v – мощность внутрен-

них источников теплоты, обусловленная диэлектрическими потерями в поле СВЧ.

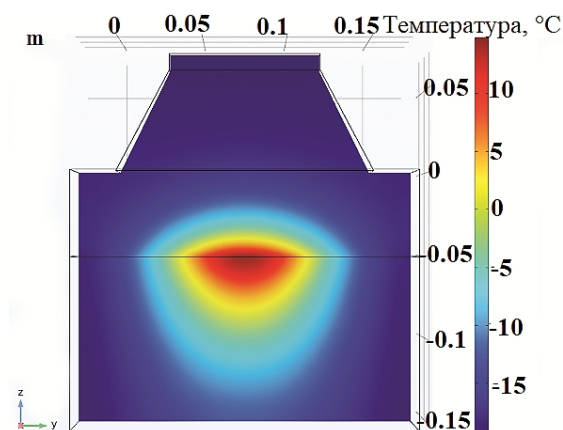
На границе воздух – диэлектрик теплообмен происходит по закону Ньютона – Рихмана:

$$\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right)_S = -\alpha \cdot (T - T_{ext}), \quad (2)$$

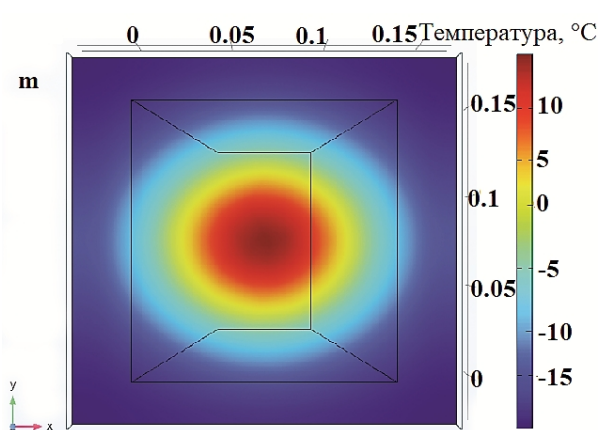
где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности S нагреваемого материала; T_{ext} – температура окружающей среды. Коэффициент теплоотдачи определяется на основе критериальных уравнений для конвективного теплообмена.

Связь между задачами электродинамики и теплопроводности определяется соотношением:

$$q_v = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \cdot |E|^2, \quad (3)$$



а



б

Рис. 2. Температурные поля: а – по оси ZY; б – по оси XY

Кроме рассмотренного рупора, было проведено моделирование разморозки грунта с помощью Н-секториального рупора, Е-секториального рупора и клиновидного рупора при той же мощности 3 Вт. Результаты расчета времени нагрева и максимальной температуры приведены

где ε_r'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости.

Для решения связанных задач (1)-(3) используется метод конечных элементов, реализованный в программе COMSOL Multiphysics [7, 8].

Было проведено моделирование нагрева слоя грунта глубиной 15 см от начальной температуры -20°C . Воздушная прослойка и имела толщину 5 см, в качестве излучателя использовался пирамидальный остроконечный рупор с размерами $150 \times 135 \times 60$ мм (рис. 1). Мощность рупора 3 кВт. Результаты приведены на рис. 2 в виде температурных полей в плоскостях ZY (продольное сечение) и XY (поперечное сечение на поверхности грунта).

в табл. 1. Исходя из результатов моделирования нагрева слоя грунта с помощью рупорных антенн различных типов, можно сделать вывод о том, что пирамидальный остроконечный рупор является наиболее эффективной излучающей системой из рассмотренных конструкций.

Таблица 1 – Результаты моделирования нагрева грунта с помощью рупорных антенн

Конструкция рупора	Пирамидальный остроконечный	Н-секториальный	Е-секториальный	Клиновидный
Время нагрева, с	60	100	120	100
Максимальная температура, $^\circ\text{C}$	13	15	15	11

Для увеличения площади термообработки грунта рассматривалось применение нескольких пирамидальных рупоров с учетом их движения относительно грунта. При моделировании скорость движения рупоров

принималась равной 5 мм/с, а СВЧ-мощность каждого рупора составляет 3 кВт. Геометрическая модель, а также результаты моделирования представлены на рис. 3.

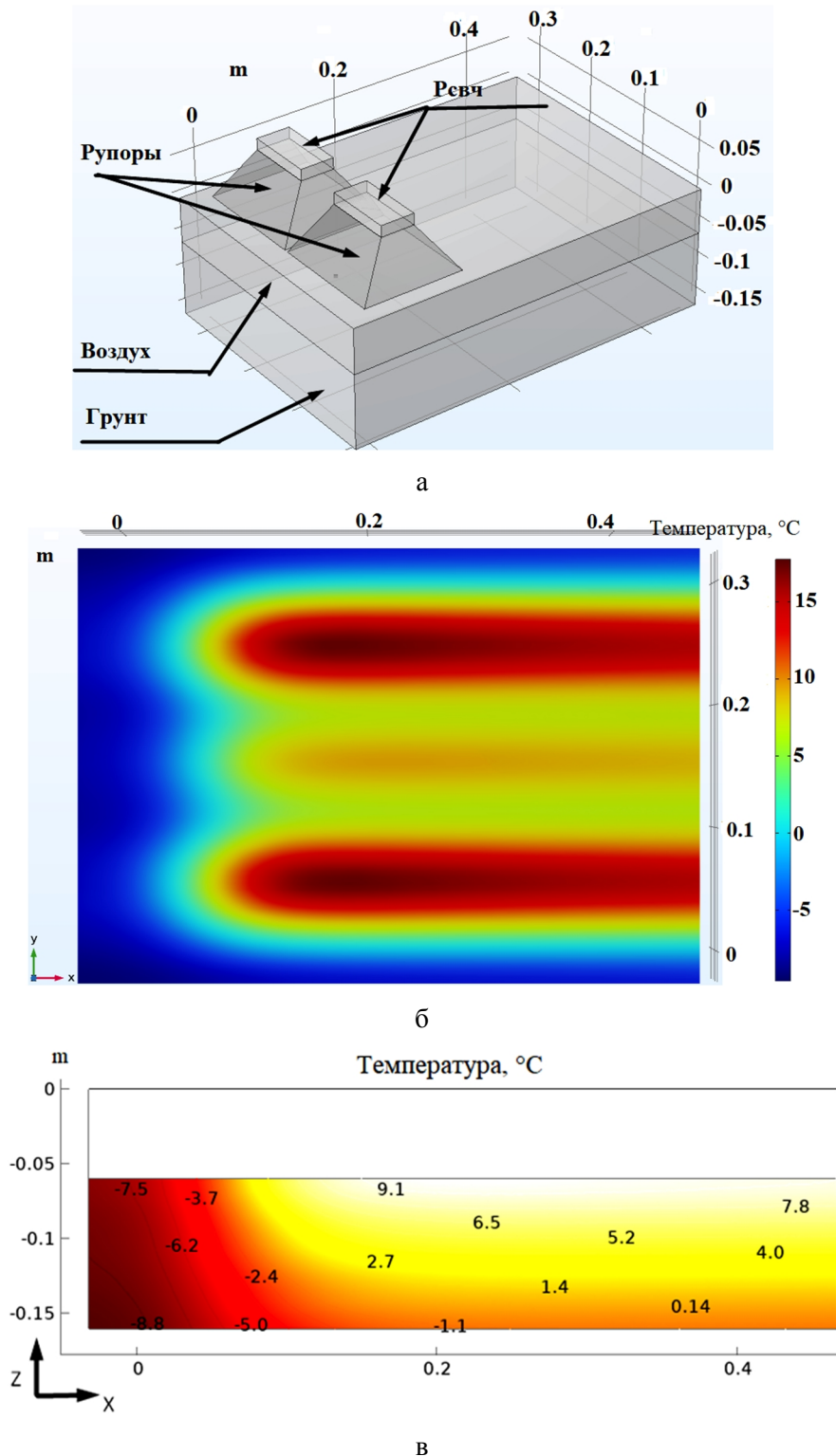


Рис. 3. Модель СВЧ-установки: а – геометрическая модель; б – температурное поле в плоскости XY на поверхности грунта; в – температурное поле в плоскости ZX по глубине грунта

Для оценки возможности применения волноводно-щелевых излучающих систем [5, 7] проводилось моделирование нагрева грунта с помощью волноводно-щелевых

излучателей со скосом вдоль узкой стенки волновода. Геометрическая модель излучающей системы и результаты моделирования представлены на рис. 4.

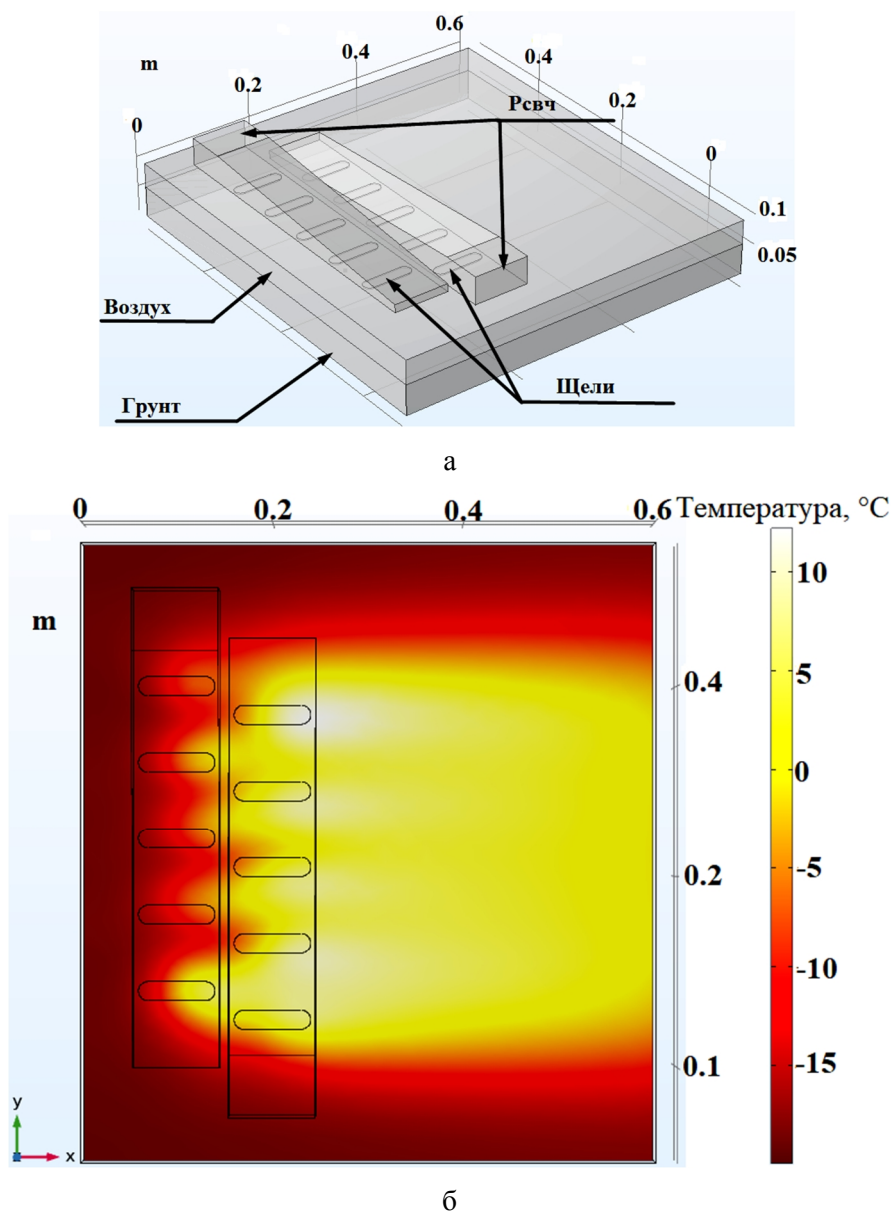


Рис. 4. Модель СВЧ-установки:

а – геометрическая модель; б – температурное поле в плоскости XY на поверхности грунта

Как видно из рис. 4 б, поле температуры на поверхности грунта при использовании волноводно-щелевых излучающих систем получается более равномерным по сравнению с рассмотренным выше для рупорных излучателей (рис. 3 б). Для размораживания грунта важной задачей является увеличения глубины его нагрева. С этой целью проведено моделирование СВЧ-нагрева грунта

с применением графитовых стержней, которые интенсивно поглощают СВЧ-энергии. Такие графитовые стержни заглубляются в грунт. Геометрическая модель, а также ее результаты моделирования представлены на рис. 5. Из полученных результатов видно, что использование поглощающих графитовых стержней позволяет увеличить глубину СВЧ-нагрева грунта.

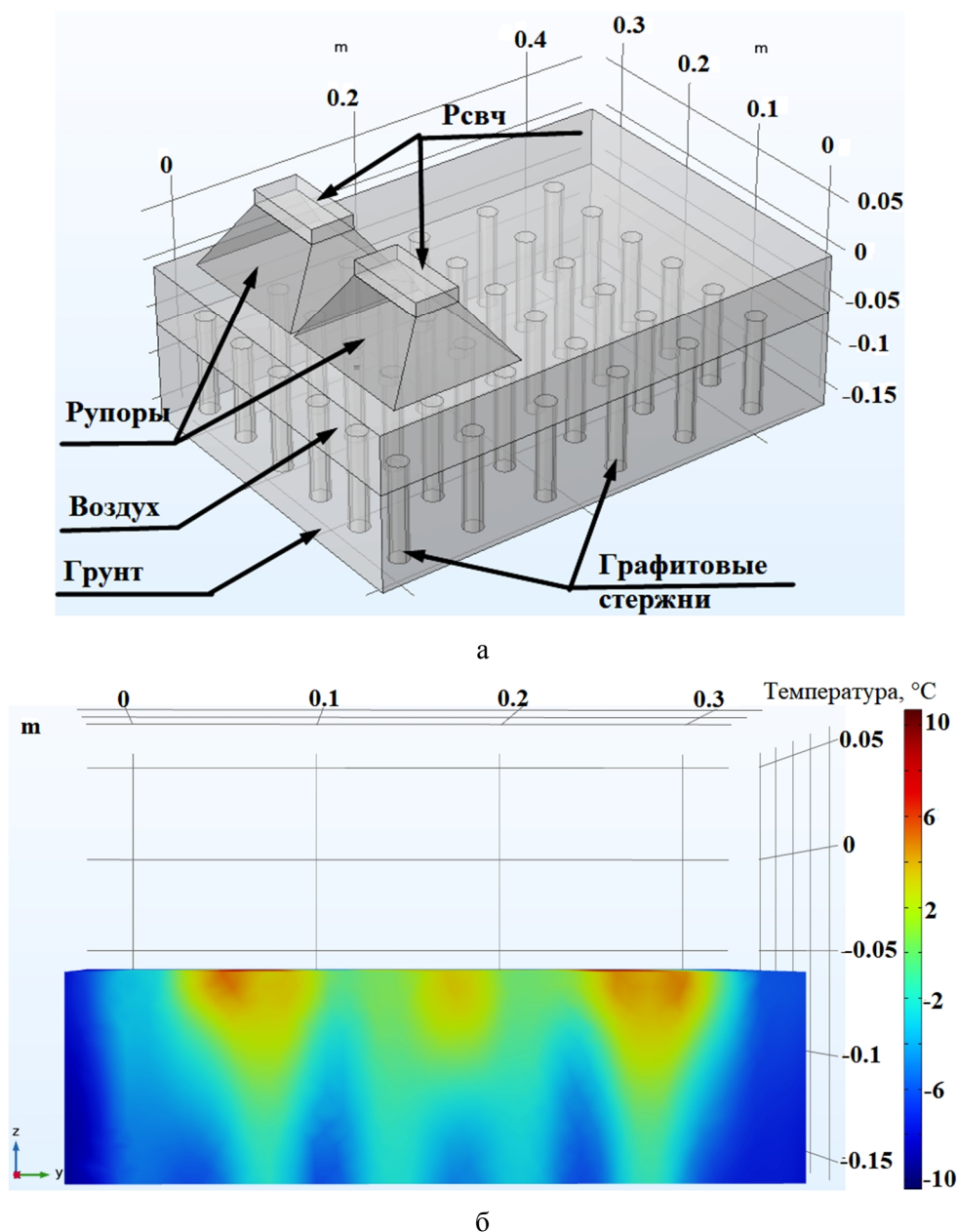


Рис. 5. Модель СВЧ-установки: а – геометрическая модель;
б – температурное поле в плоскости ХУПо глубине грунта

Выводы

1. Из рассмотренных рупорных антенн для размораживания грунта наиболее эффективно применение антенн с пирамидально остроконечной конструкцией.
2. При использовании волноводно-щелевой излучающей системы равномер-

ность нагрева грунта и эффективность его размораживания выше по сравнению с рупорными излучателями.

3. Применение графитовых стержней, поглощающих электромагнитную энергию, позволяет увеличить глубину нагрева грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эффективность и потенциал сбережения топлива и энергии в северо-восточном регионе России / Ю.В. Бебихов, Е.И. Грачева,

С.Н. Павлова, А.С. Семенов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 4 (48). С. 14-28.

2. **Архангельский Ю.С., Арделян Н.Г.** Термообработка диэлектриков в установках СВЧ с бегущей волной // Радиотехника. 1974. XVII. № 5. С. 31-37.

3. **Сергеев В.И., Сосунов В.С.** Применение антенн сантиметрового диапазона: учеб. пособие. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. 64 с.

4. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии: справочник. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 564 с.

5. **Kalganova S., Trigorly S., Zakharov V.** Computer Simulation of Microwave Heat Treatment of Dielectrics // IV International conference on information technologies in engineering education (IN-FORINO). MPEI. Moscow, 2018. P. 1-5.

6. **Jin J.-M.** The finite element method in electromagnetics. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2002. 389 p.

7. Моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектриков с применением пакета COMSOL MULTIPHYSICS / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 6-10.

8. Моделирование СВЧ электротехнологических процессов и установок с помощью программного пакета COMSOL MULTIPHYSICS / С.В. Тригорлый, В.С. Алексеев, С.Г. Калганова, В.В. Захаров. Саратов: Амирит, 2019. 105 с.

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Чудров Айдар Алексеевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Trigorly – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aidar A. Chudrov – Master student, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 14.03.23, принята к опубликованию 27.03.23

УДК 621.365.5

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫМИ ИЗЛУЧАЮЩИМИ СИСТЕМАМИ

С.В. Тригорлый, В.Е. Желнов

COMPUTER SIMULATION OF MICROWAVE ELECTRICAL INSTALLATIONS WITH SLOTTED WAVEGUIDE RADIATION SYSTEMS

S.V. Trigorly, V.E. Zhelnov

Камеры лучевого типа являются малоизученными в технологии СВЧ-обработки диэлектриков. В данной статье рассмотрено моделирование СВЧ-установок с волноводно-щелевыми излучающими системами, работающими в периодическом и методическом режимах. Для периодического режима термообработки исследовано влияние положения диэлектрика в СВЧ-камере, формы и количества щелей в волноводе на равномерность и скорость нагрева объекта.

Для методического режима исследовано влияние скорости движения излучающей системы и СВЧ-мощности на равномерность термообработки мерзлого грунта. Компьютерное моделирование электродинамических и тепловых процессов выполнено в среде COMSOL Multiphysics. Представлены результаты моделирования нагрева диэлектриков при частоте СВЧ-излучения 2,45 ГГц.

Ключевые слова: СВЧ-установка, термообработка диэлектриков, компьютерное моделирование, волноводно-щелевая система, периодический и методический нагрев

Среди существующей классификации СВЧ камер в настоящее время наименее исследованным видом считаются камеры лучевого типа. Данный вид камер позволяет обрабатывать крупногабаритные объекты, размеры которых не позволяют поме-

Beam-type chambers are understudied in terms of technology for microwave processing of dielectrics. The article considers simulation of microwave installations with slotted waveguide radiation systems operating in periodic and methodical action regimes. Regarding the periodic heat treatment regime, the authors investigated effects of the position of dielectrics in the microwave chamber, the shape and number of slots in the waveguide on the uniformity and rate of heating an object.

Regarding the methodical action mode, the influence of the radiation system rate and microwave capacity on the uniformity of thermal treatment of frozen soil was investigated. Computer simulation of electrodynamic and thermal processes was performed in the COMSOL Multiphysics software. The simulation results of heating the dielectrics under the microwave radiation frequency of 2.45 GHz are presented.

Keywords: microwave installation, heat treatment of dielectrics, computer simulation, slotted waveguide system, periodic and methodical action heating

стить их в камеры со стоячей или бегущей волной [1]. Если объект достаточно велик, то в лучевых камерах могут применять механическое или электрическое сканирование луча, использовать несколько антенн для облучения поверхности объекта для

повышения производительности установки и технологического процесса.

С помощью камер лучевого типа можно проводить размораживание мерзлого грунта, борьбу с сорняками на сельскохозяйственных полях или в парниках, обеззараживать почву и т. п. [2].

Среди камер лучевого типа получили распространение волноводно-щелевые антенны [3], которые позволяют добиться равномерного облучения обрабатываемого объекта, размеры их по сравнению с рупорными антеннами невелики.

Возбуждение щели осуществляют обычно с помощью прямоугольного волновода, имеющего с рабочей камерой общую стенку, в которой и прорезана одна или несколько щелей. Равномерность облучения обрабатываемого объекта можно обеспечить подбором числа щелей, их ширины и расстояния между щелями [4].

В статье [5] описывается конвейерная СВЧ-установка с волноводно-щелевой излучающей системой, предназначенная для термообработки диэлектриков.

В данной работе рассматривается компьютерное моделирование СВЧ-установок с волноводно-щелевой излучающей системой применительно к нагреву эпоксидной смолы ЭД-20 в СВЧ-камере периодического действия и термообработки грунта в методическом режиме при использовании подвижных излучателей.

СВЧ-установка периодического действия включает в себя один волновод, в нижней стенке которого вырезаны щели с геометрией, соответствующей подаваемой мощности СВЧ-излучения для исключения пробоя (рис. 1). Установка методического типа представляет собой два расположенных противоположно друг другу волновода, конструкция каждого из которых аналогична установке периодического действия (рис. 2). СВЧ-установки работают на частоте 2,45 ГГц.

Модель на рис. 2 учитывает измерение температуры в заданной точке на поверхности диэлектрика, где на практике температура может измеряться с помощью пирометра излучения.

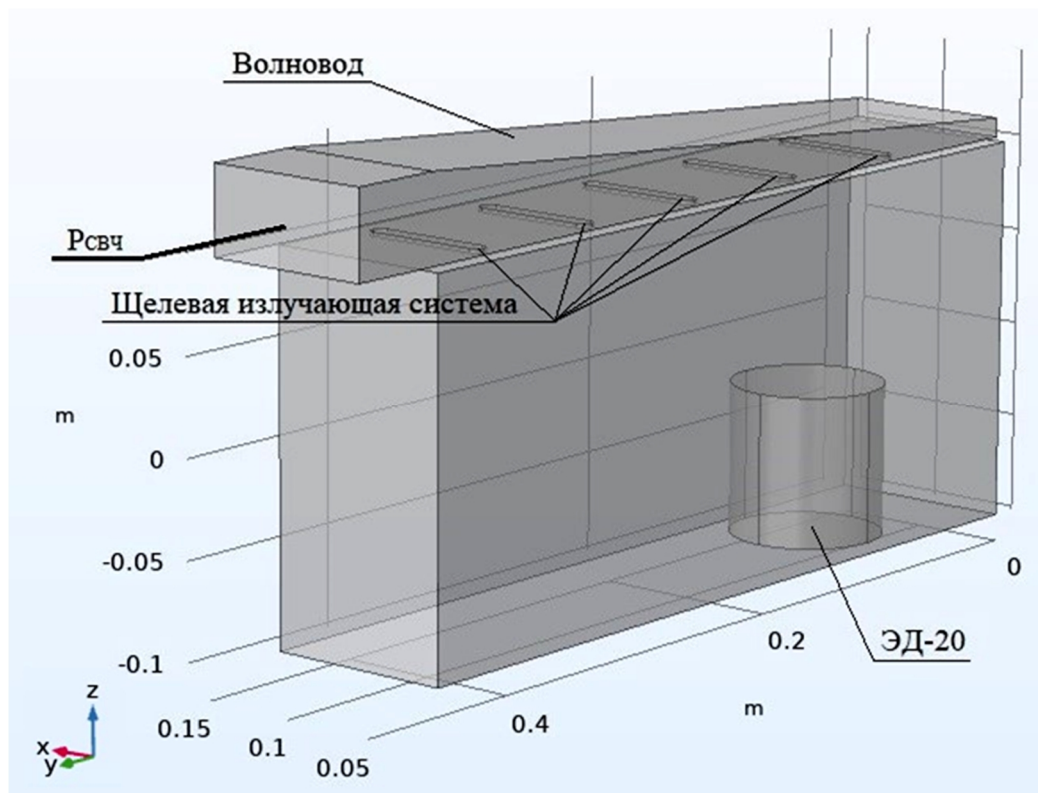


Рис. 1. Геометрическая модель СВЧ-установки периодического типа с волноводно-щелевой излучающей системой

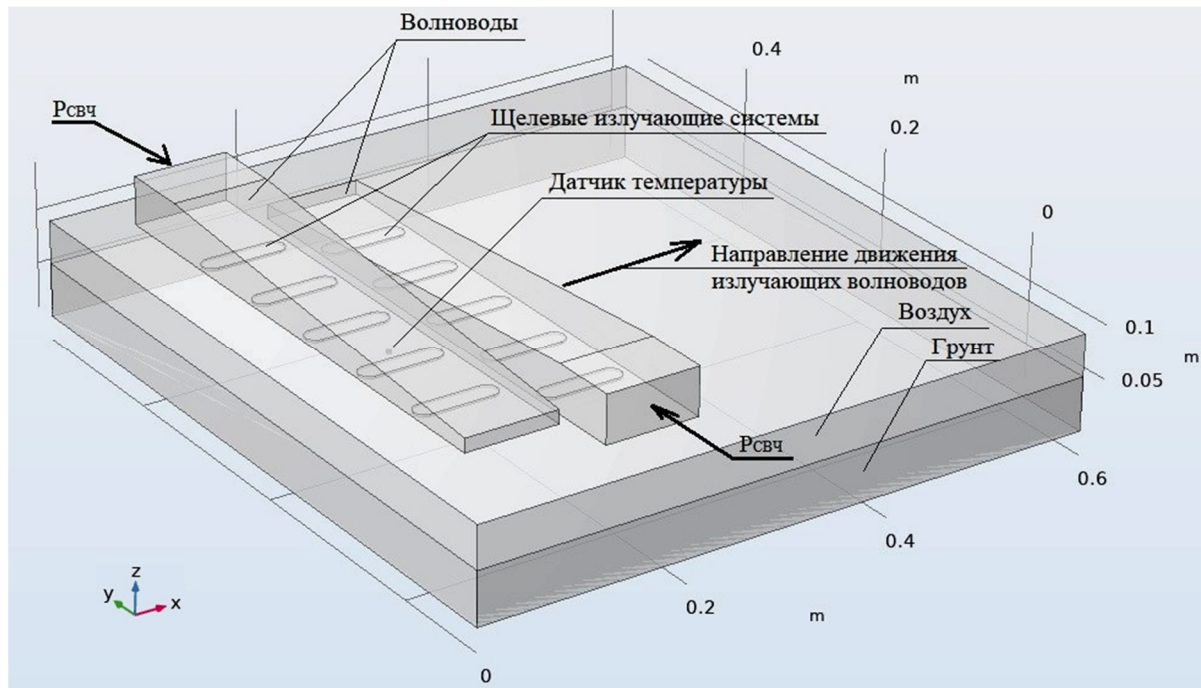


Рис. 2. Геометрическая модель СВЧ-установки методического типа с волноводно-щелевой излучающей системой

Компьютерное моделирование электротехнологических процессов при СВЧ-термообработке диэлектриков основано на решении системы взаимосвязанных уравнений электродинамики и теплопроводности [1].

Задачи теплопроводности, теплообмена диэлектрика с окружающим воздухом, электродинамики волновых процессов, отражения электромагнитной волны с соответствующими граничными условиями для СВЧ-термообработки диэлектриков описываются в статьях [5] и [6].

Для моделирования указанных задач в трехмерной постановке использовалось программное обеспечение COMSOL Multiphysics [7].

С целью достижения лучшей равномерности распределения электрического поля и температурного поля в нагреваемом диэлектрике было проведено предварительное моделирование с оптимизацией конструкции волноводно-щелевой излучающей системы.

Исследовано влияние положения диэлектрика в СВЧ-камере, скорости движения излучающей системы над нагреваемым материалом и регулирования мощности

СВЧ-излучения на скорость нагрева и равномерность термообработки. Также изучено влияние размеров щелей в стенке волновода и их положение относительно СВЧ-ввода, в результате чего были выбраны оптимальные параметры.

Для СВЧ-установки периодического типа выбрано расположение диэлектрика (эпоксидной смолы) ЭД-20 в той части камеры, где наблюдается максимальная напряженность электрического поля и наилучшая скорость нагрева. В результате моделирования было установлено, что для обеспечения максимальной равномерности нагрева грунта толщина воздушной прослойки составляет 4 см, а ширина щелей при СВЧ-мощности 1000 Вт соответствует 1 см, при 3000 Вт – 2 см, толщины стенки волновода 2 мм.

В данной работе предложено использовать нерегулярный волновод со щелями, у которого толщина его узкой стенки уменьшается вдоль распространения электромагнитной волны. Моделирование термообработки грунта с использованием обычного прямоугольного волновода со щелями показало, что наибольший нагрев грунта происходит в области, под 3-5 ще-

лями от СВЧ-ввода. Другая крайняя область излучающей системы нагревается в значительно меньшей степени (разница температур по разным краям антенны составляет 7 °С).

На основе проведенного моделирования нагрева грунта с применением нерегулярных волноводов с излучающими щелями было установлено, что температурный максимум в объеме грунта под каждым излучателем располагается также ближе к последней щели от СВЧ-ввода, однако нагрев происходит быстрее, а разница температур в разных участках грунта составляет не более 4 °С. Размещение волноводов в установке методического типа противоположно друг другу на расстоянии 1 см при относительном смещении волноводов вдоль их длины на 1,5 см (рис. 2) позволяет добиться более равномерного распределения температуры на поверхности объекта при движении излучающей системы.

Таким образом, применение двух нерегулярных волноводно-щелевых излучателей способствует увеличению площади равномерного термического воздействия на объект.

Геометрия широкой и узкой стенок волновода до начала скоса соответствует частоте 2,45 ГГц – 90×45 мм. Углы щелей в обоих случаях делаются закругленные (рис. 1, 2).

В СВЧ-установке периодического действия основной задачей является достижение образцом эпоксидной смолы ЭД-20 цилиндрической формы температуры 140 °С за минимальное время при мощности СВЧ-излучения 1000 Вт. Исходные данные для моделирования этого процесса нагрева представлены в табл. 1. Для указанных данных проведено моделирование электрического поля в рабочей камере и температурного поля в нагреваемом образце.

Таблица 1 – Исходные данные СВЧ-установки периодического типа и объекта нагрева

Параметр	Значение
Диаметр нагреваемого материала, м	0,08
Высота нагреваемого материала, м	0,08
Длина волновода, м	0,45
Ширина камеры, м	0,1
Высота камеры, м	0,2
СВЧ-мощность волноводно-щелевого излучателя, кВт	1
Диэлектрическая проницаемость нагреваемого материала	2,37–j0,377
Электрическая проводимость, Сим/м	$3,125 \cdot 10^{-15}$
Коэффициент теплопроводности нагреваемого материала, Вт/(м·°С)	0,17
Удельная теплоемкость нагреваемого материала, Дж/(кг·°С)	1150
Плотность нагреваемого материала, кг/м ³	1200
Начальная температура нагреваемого материала, °С	20
Конечная температура нагреваемого материала, °С	140

На рис. 3 представлены результаты моделирования СВЧ-нагрева эпоксидной смолы ЭД-20 цилиндрической формы. Максимальная напряженность электрического поля составляет около $7,47 \cdot 10^4$ В/м (рис. 3 а). При воздействии СВЧ излучения мощностью 1000 Вт диэлектрик локально про-

грелся от изначальной температуры 20 °С до 140 °С (рис. 3 б) за 26 секунд, что соответствует технологическим требованиям. Температурный максимум приходится на нижнюю часть цилиндра (рис. 3 б). Оставшийся большой объем диэлектрика прогрелся до 50 °С.

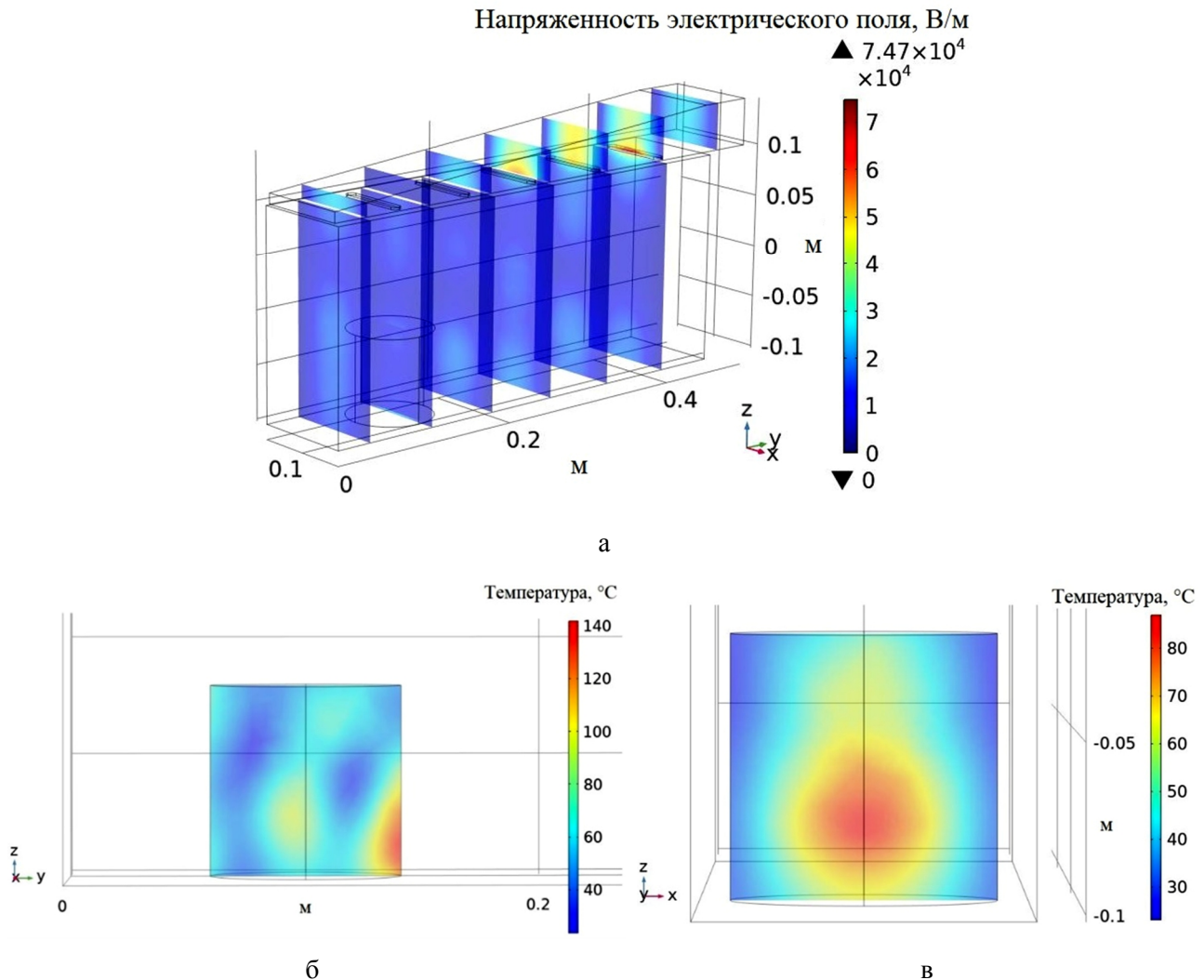


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования нагрева ЭД-20 в СВЧ-установке периодического типа: а – распределение электрического поля в различных сечениях СВЧ-камеры при установленной мощности 1000 Вт; б – распределение температурного поля в сечении yz цилиндрической заготовки; в – распределение температурного поля в сечении xz цилиндрической заготовки

При моделировании СВЧ-установки в методическом режиме работы задача заключается в достижении равномерного нагрева заданной площади грунта с помощью подвижной излучающей системы, состоящей из двух волноводно-щелевых излучателей (рис. 2). Исходные данные, используемые при моделировании СВЧ-установки, приведены в табл. 2.

Для большей эффективности термообработки с целью прогрева стартового участка грунта используется следующий алгоритм регулирования скорости и СВЧ-мощности в зависимости от температуры в заданной точке на поверхности грунта.

Скорость излучающей системы сразу после включения СВЧ-мощности равна нулю вплоть до достижения обозначенного значения температуры $T_1 = -2^\circ\text{C}$, после чего начинается движение излучающей системы с заданной скоростью. При достижении температуры размораживания $T_2 = 0^\circ\text{C}$ СВЧ-мощность отключается, а при снижении температуры до $T_1 = -2^\circ\text{C}$ СВЧ-мощность вновь включается. Таким образом, осуществляется позиционное регулирование подаваемой мощности в зависимости от заданной температуры наружной поверхности грунта.

Таблица 2 – Исходные данные СВЧ-установки методического типа и объекта нагрева

Параметр	Значение
Длина участка грунта, м	0,6
Ширина участка грунта, м	0,65
Высота участка грунта, м	0,05
Толщина воздушной прослойки, м	0,04
Длина волновода, м	0,45
Расстояние между волноводами, м	0,001
СВЧ-мощность каждого волноводно-щелевого излучателя, кВт	3
Диэлектрическая проницаемость нагреваемого материала	$2,6-j0,377$
Коэффициент теплопроводности нагреваемого материала, Вт/(м·°C)	1,49
Удельная теплоемкость нагреваемого материала, Дж/(кг·°C)	1150
Плотность нагреваемого материала, кг/м ³	2000
Начальная температура нагреваемого материала, °C	-10
Температура отключения подачи СВЧ-излучения, °C	0
Температура, при достижении которой система приходит в движение, °C	-2
Время движения волноводов относительно нагреваемого материала, с	1200

Результаты моделирования нагрева мерзлого грунта до температуры размораживания 0 °C СВЧ-установкой с подвижной излучающей системой приведены на рис. 4, 5 в виде электрического и температурного полей на поверхности обрабатываемого материала и диаграмм изменения температуры и напряжённости электрического поля в заданной точке. Максимальная

напряженность на поверхности грунта составляет около $5,45 \cdot 10^3$ В/м (рис. 4 а).

Из рис. 4 видно, что при воздействии СВЧ-излучения мощностью 3000 Вт грунт локально прогрелся от начальной температуры -10 до 7 °C. Температурные максимумы располагаются равномерно в четырёх точках по длине второго волновода.

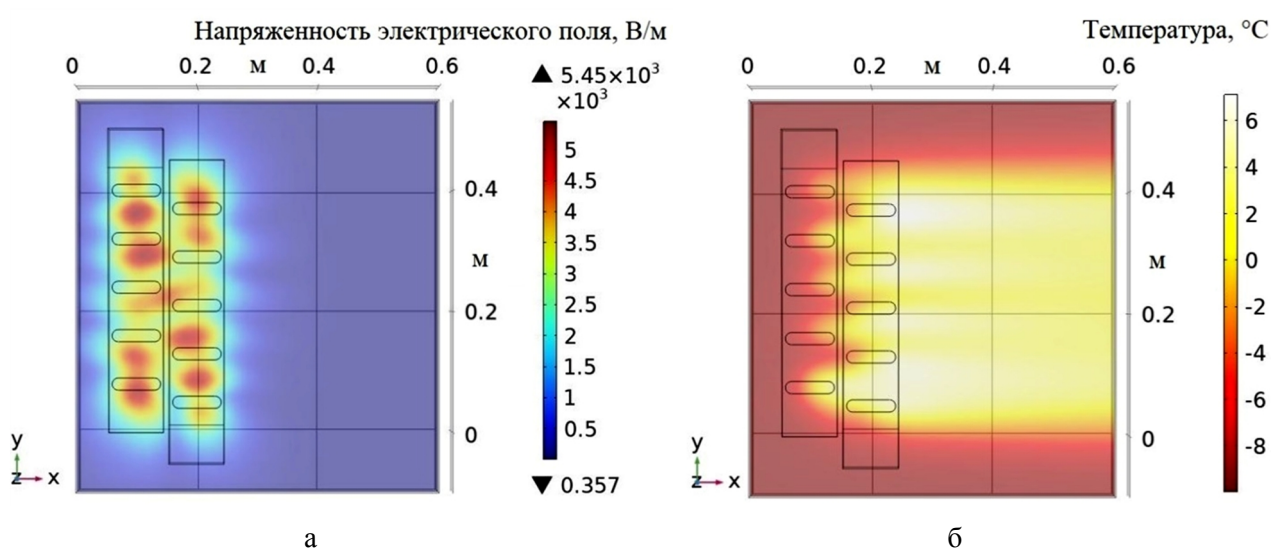


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования нагрева грунта в СВЧ-установке методического типа: а – распределение электрического поля при установленной мощности 3000 Вт; б – распределение температурного поля на поверхности грунта

В результате моделирования установлено, что скорость движения излучающей системы, позволяющая достичь стабильного темпа нагрева, составляет 0,5 мм/с.

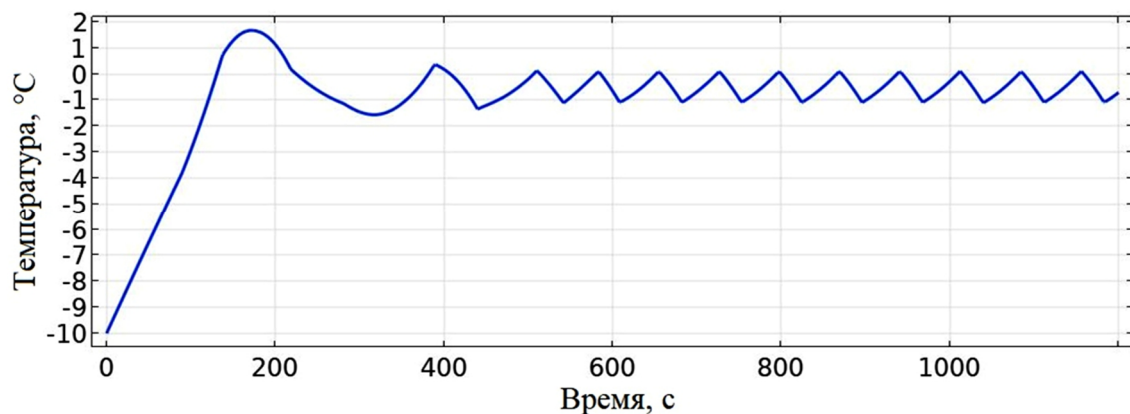
Согласно установленному алгоритму, излучающая система приходит в движение через 110 с после включения СВЧ-мощности при достижении температуры в контрольной точке -2°C , после чего скорость движения излучающей системы относительно нагреваемого грунта постоянна и равна 0,5 мм/с.

На рис. 5 а можно отметить многократное падение температуры в точке измерения до -1°C с последующим ростом до

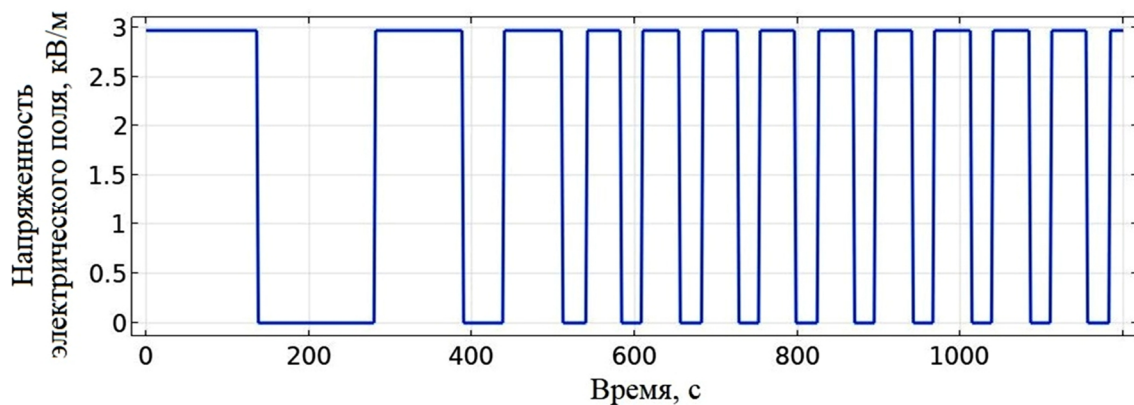
0°C в соответствии с алгоритмом регулирования мощности СВЧ-излучения.

Основываясь на графиках зависимости температуры и изменения напряжённости электрического поля в заданной точке от времени (рис. 5), можно наблюдать квазистационарный режим, начинающийся спустя 500 с после начала процесса СВЧ-обработки грунта.

На протяжении всего процесса кратковременное отключение СВЧ-излучения осуществлялось 12 раз (рис. 5 б). Таким образом, для данной площади обрабатываемого материала с учетом остальных условий из табл. 2 общее время работы магнетронов составило 711 с.



а



б

Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования нагрева грунта в СВЧ-установке методического типа: а – график зависимости температуры заданной точки от времени; б – график изменения электрического поля в заданной точке

Выводы

1. В ходе компьютерного моделирования получены оптимальные параметры

СВЧ-установок с волноводно-щелевыми излучателями, в число которых входят расположение диэлектрика в рабочей камере,

геометрия щелей в волноводе и их расположение относительно СВЧ-ввода, оптимальное расстояние от волновода до нагреваемого диэлектрика – 4 см, скорость движения СВЧ-излучающей системы – 0,5 мм/с.

2. Моделирование регулирования скорости движения излучающей системы и мощности СВЧ-излучения позволило

определить площадь равномерной термообработки мерзлого грунта при минимальных энергозатратах.

3. Результаты работы могут быть использованы при разработке СВЧ-установок с волноводно-щелевыми излучателями и систем автоматического управления СВЧ-нагревом диэлектриков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термия: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.

2. **Архангельский Ю.С., Воронкин В.А.** Элементарная база СВЧ электро-термического оборудования. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.

3. **Сергеев В.И., Сосунов В.С.** Применение антенн сантиметрового диапазона: учеб. пособие. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. 64 с.

4. **Гришина Е.М.** Антенные излучатели камер лучевого типа СВЧ электротермических установок // Радиотехника и связь: материалы четвертой Междунар. науч. конф. Саратов, 2007. С. 165-168.

5. Моделирование термообработки диэлектриков в СВЧ-установке конвейерного

типа / С.В. Тригорлый, В.В. Захаров, С.Г. Калганова и др. // Вопросы электро-технологии. 2022. № 3 (36). С. 13-22.

6. **Frei W.** Using perfectly matched layers and scattering boundary conditions for wave electromagnetics problems. Текст: электронный // COMSOL: [сайт]. 2015. 28 янв. URL: <https://www.comsol.com/blogs/using-perfectly-matched-layers-and-scattering-boundary-conditions-for-wave-electromagnetics-problems/> (дата обращения 04.12.2022).

7. Моделирование СВЧ электротехнологических процессов и установок с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics: учеб. пособие по курсу «Электропечи сопротивления» / С.В. Тригорлый, В.С. Алексеев, С.Г. Калганова, В.В. Захаров. Саратов: Амирит, 2019. 105 с.

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Желнов Владислав Евгеньевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Trigorly – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladislav E. Zhelnov – Master student, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 14.03.23, принята к опубликованию 27.03.23

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.3.027.3+629.3.064.5

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ

А.М. Абакумов, А.А. Горячкин, Д.Г. Рандин

INVESTIGATION OF THE TRANSVERSE STABILITY SYSTEM OF A VEHICLE WITH ELECTROMECHANICAL ACTIVE SUSPENSION

A.M. Abakumov, A.A. Goryachkin, D.G. Randin

В статье рассматривается система стабилизации поперечной устойчивости автомобиля с подвеской, в которой в качестве активного элемента выступает линейный двигатель постоянного тока (ЛДПТ). Для принятой расчетной модели получены аналитические зависимости для определения дополнительных усилий на подвеске, вызванного центробежной силой, и управляющего воздействия, создаваемого ЛДПТ. Сформирована структура замкнутой по углу крена автомобиля системы автоматического управления, и рассмотрены динамические характеристики ее элементов. Приведена методика синтеза регулятора системы управления, базирующаяся на использовании эталонных передаточных функций. Показано, что высокие показатели качества регулирования могут быть достигнуты за счет использования в системе ПИД-регулятора. Разработана компьютерная модель системы, и для типичных параметров объекта управления проведено исследование ее динамических характеристик при отработке возмущения в виде изменения центробежной силы. Установлено, что использование разработанной САУ обеспечивает высокую точность стабилизации угла крена автомобиля.

The article considers a system of vehicle roll stability with the suspension where the linear DC motor (LDCM) acts as an active component. For the accepted computational model, analytical dependences required to determine additional forces on vehicle suspensions induced by the centrifugal force and the LDCM control effects have been obtained. The design principle of the closed roll-control system for the vehicle self-driving system has been formed and dynamic characteristics of its components considered. A methodology for synthesizing a control system regulator based on the use of the reference transfer functions is presented. It is shown that high quality control level can be achieved by providing the system with a proportional-integral-differential regulator. A computer model of the system has been developed and typical parameters of the control object in terms of its dynamic characteristics under the perturbation formed by the changes in the centrifugal force have been studied. It is established that the use of the developed ACS ensures high accuracy of the vehicle roll stability.

Ключевые слова: *поперечная устойчивость автомобиля, активная подвеска автомобиля, система стабилизации, линейный двигатель постоянного тока*

Введение

В современном автомобилестроении значительное внимание уделяется проблемам обеспечения виброзащиты, плавности хода, устойчивости и управляемости транспортных средств [1]. Для современных высокоскоростных автомобилей актуальна проблема обеспечения поперечной устойчивости автомобиля при маневрах типа «переставка» и «вход в поворот» [2].

Повышение показателей поперечной устойчивости может быть достигнуто за счет совершенствования конструкции подвески и систем управления ее элементами.

Подвеска транспортного средства предназначена для уменьшения динамических нагрузок, передающихся автомобилю при движении по неровностям опорой поверхности дороги, а также обеспечивает передачу всех сил и моментов, действующих между колесами и рамой (кузовом) [3].

При кренах автомобиля с традиционным механическим стабилизатором [4] под действием центробежной силы упругие элементы подвески внешних по отношению к центру поворота колес сжимаются, упругий стержень стабилизатора закручивается и создает сжимающее усилие упругих элементов подвески внутренних колес, что уменьшает крен кузова автомобиля.

Необходимо учитывать противоречивый характер требований к характеристикам подвески. Эффективность стабилизации крена может быть достигнута путем увеличения жесткости подвески. В то же время это приводит к ухудшению ее виброзащитных свойств [5-7].

Чтобы устранить отмеченные противоречия применяют стабилизаторы с активным разделением торсионного стержня на две части. Они в зависимости от дорожной ситуации могут соединяться либо разъединяться гидравлическим [8], либо электро-механическим исполнительным элементом. Для достижения высокой точности стаби-

Keywords: *vehicle roll stability, active suspension of a vehicle, stability system, linear DC motor*

лизации положения кузова используют системы управления, обеспечивающие активное закручивание частей торсионного стержня.

Учитывая тенденции развития электро-автомобиля, в настоящее время перспективными для решения задачи управления креном представляются исполнительные элементы в виде линейных двигателей [9, 10], которые устанавливаются параллельно упругому элементу и амортизатору традиционной подвески каждого колеса одной или двух осей. Система управления активной подвеской в случае входа в поворот по информации об угле поворота рулевого колеса и скорости движения переключается в режим стабилизации крена и обеспечивает взаимосвязанное управление подвесками соответствующей оси.

Результаты исследований

При построении математической модели объекта управления в качестве выходной координаты рассматривается угол крена автомобиля, порождаемый действием центробежной силы на повороте.

Дополнительное усилие, действующее на автомобиль на поворотах, приводит к упругим деформациям подвески и неупругой части автомобиля. Жесткость неупругой части существенно выше жесткости подвески и не оказывает существенного влияния на крен автомобиля на поворотах.

Примем допущение об идентичности подвесок, и для каждой из них используем расчетную схему одномассовой колебательной системы, представленную на рис. 1. На рисунке обозначены: m – поддрессоренная масса, приходящаяся на одну подвеску; Z_0 – кинематическое возмущающее воздействие, обусловленное неровностями дорожного полотна; C – жесткость упругого элемента; β – коэффициент гидравлического сопротивления демпфирую-

щего элемента; Z – вертикальное перемещение массы m ; F_M – усилие, создаваемое исполнительным элементом; F_{cs} – вертикальное усилие, создаваемое в подвеске, центробежной силой F_c .

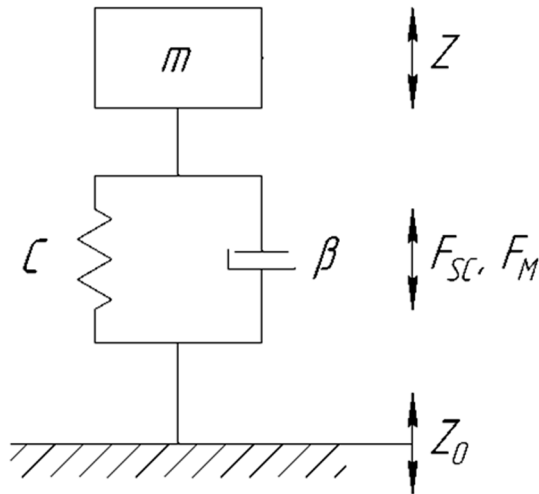


Рис. 1. Расчетная схема одномассовой колебательной системы

На объект массой m , движущийся со скоростью V по окружности радиусом R , действует центробежная сила F_c :

$$F_c = \frac{m_2 V^2}{R}.$$

Из-за воздействия центробежной силы, на каждую подвеску автомобиля (поддрессоренную массу) действует сила сжатия или растяжения, в зависимости от направления центробежной силы. Используем общепринятые допущения. В частности, будем считать, что центр масс совпадает с центром автомобиля, кузов автомобиля является абсолютно жестким телом, инерционный момент, вызванный поворотом кузова относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести, не оказывает существенного влияния на перераспределение усилий при крене.

Для установившихся режимов методика расчета усилий, действующих на автомобиль при повороте, рассмотрена в [10, 11]. С учетом этих исследований найдена взаимосвязь деформирующего

усилия F_{cs} в подвеске с центробежной силой F_c . Для «малых» отклонений она может быть описана коэффициентом передачи:

$$k_{SC} = \frac{F_{SC}}{F_c} = \frac{h_n b_n}{a_n^2 + b_n^2 + h_n^2}, \quad (1)$$

где h – высота центра масс поддрессоренной части автомобиля относительно точек опоры на подвески; a_n – расстояние от центра масс поддрессоренной части автомобиля до точки опоры на n -подвеску по продольной оси автомобиля; b_n – расстояние от центра масс поддрессоренной части автомобиля до точки опоры на n -подвеску по поперечной оси автомобиля.

Угол крена автомобиля на повороте в стационарном режиме определяется параметром b и деформацией подвески $\delta Z = Z - Z_0$:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\partial Z}{b}\right) \approx \frac{\delta Z}{b}.$$

Соответственно, зависимость угла крена от деформаций подвески для «малых» отклонений может быть представлена коэффициентом передачи

$$k_\alpha = \frac{\alpha}{\delta Z} = \frac{1}{b}. \quad (2)$$

Математическая модель для расчета динамических процессов формируется на основе уравнений Лагранжа второго рода. Операторные уравнения движения для «малых» отклонений с учетом силового воздействия F_M и дополнительного усилия F_{cs} получены в виде:

$$m p^2 Z(p) + (\beta p + C)(Z_0(p) - Z(p)) \pm \pm F_M(p) \pm F_{SC}(p) = 0. \quad (3)$$

Здесь знак плюс при F_{cs} соответствует подвеске внутреннего колеса автомобиля при повороте, знак минус – подвеске внешнего колеса.

Полученным соотношениям (1), (2), (3) соответствует структурная схема одной подвески, показанная на рис. 2.

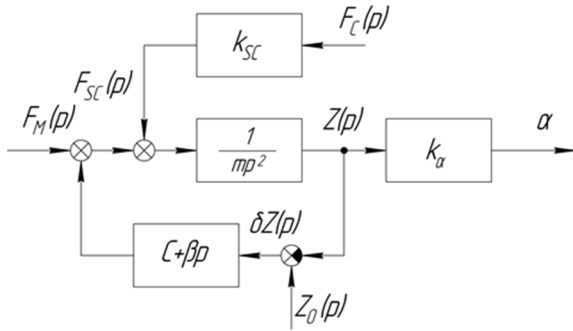


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

В предлагаемой работе ограничимся исследованием ситуации движения на повороте при отсутствии неровностей дорожного полотна, т. е. примем $Z_0 = 0$. Будем считать, что механический стабилизатор поперечной устойчивости не используется, и крен ликвидируется только активными исполнительными элементами. Система управления содержит аналогичные каналы управления отдельными подвесками. В зависимости от знака сигнала датчика крена на подвески внутреннего и внешнего колеса исполнительным элементом создается дополнительное усилие на сжатие либо отбой. Учитывая аналогичность каналов управления подвесками, рассматривается один канал управления.

Выходной переменной объекта управления является угол крена, входной – усилие, создаваемое исполнительным элементом. В соответствии со структурной схемой передаточная функция объекта по управляющему воздействию

$$W_u(p) = \frac{\alpha(p)}{F_M(p)} = W_{u1}(p) k_\alpha; \quad (4)$$

где

$$W_{u1}(p) = \frac{Z(p)}{F_M(p)} = \frac{1/C}{\frac{m^2}{C} p^2 + \frac{\beta}{C} p + 1} = \quad (5)$$

$$= \frac{1/C}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1};$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{C}}; \quad T_2 = \frac{\beta}{C}. \quad (6)$$

Передаточная функция объекта по возмущению для входной переменной – центробежная сила F_c , и выходной – угол крена:

$$W_{ac}(p) = \frac{\alpha(p)}{F_c(p)} = \frac{k_{ac}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (7)$$

где коэффициент передачи объекта по возмущению

$$k_{ac} = \frac{\alpha}{F_c} = \frac{1}{C} k_{sc} k_c. \quad (8)$$

Рассмотрена САУ с исполнительным элементом – линейным двигателем постоянного тока (ЛДПТ). Двигатель управляется напряжением U на якоре при постоянном магнитном потоке Φ , и создает дополнительное механическое усилие F_M в подвеске. Операторные уравнения движения ЛДПТ имеют вид [4]

$$U(p) = E(p) + I(p) R [1 + T_e p];$$

$$E(p) = \frac{1}{k_e} p Z(p);$$

$$F_M(p) = k_e I(p); \quad (9)$$

где E – наведенная в якоре ЭДС; I – ток якоря; $T_e = L/R$ – электромагнитная постоянная ЛДПТ; L – индуктивность цепи якоря; R – сопротивление якорной цепи двигателя; $k_e = c\Phi$ – коэффициент передачи двигателя; c – конструктивный коэффициент.

Инерционность якорной цепи ЛДПТ отражается передаточной функцией:

$$W_{e1}(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{1/R}{1 + T_e p}. \quad (10)$$

Структурная схема одного канала замкнутой системы управления углом крена, учитывающая динамические свойства исполнительного органа, приведена на рис. 3.

Она, наряду со звеньями, отражающими динамические свойства объекта управления и ЛДПТ, содержит звено с коэффициентом передачи датчика угла крена k_{sa} , а также передаточные функции регулятора $W_R(p)$ и управляемого силового преобразователя $W_{co}(p)$.

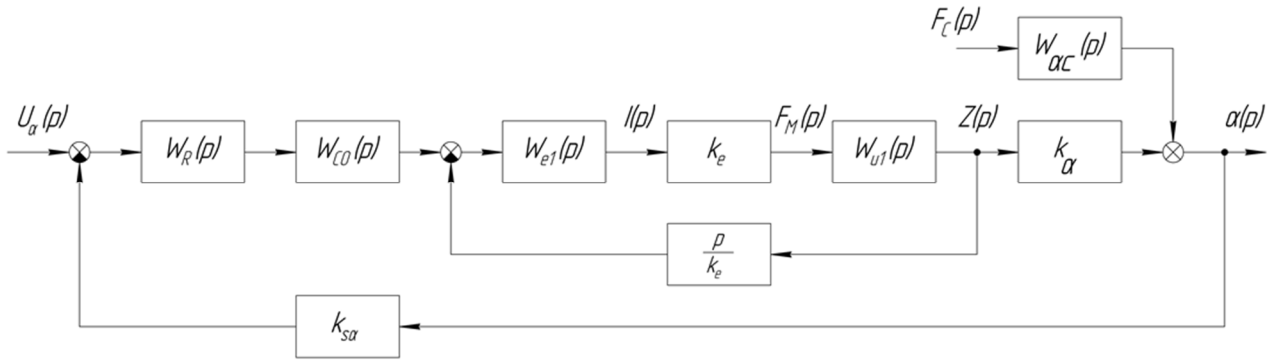


Рис. 3. Структурная схема замкнутой системы управления углом крена

Динамические свойства управляемого силового преобразователя представим передаточной функцией апериодического звена.

$$W_{co}(p) = \frac{k_{co}}{T_{co} p + 1}. \quad (11)$$

Постоянные времени T_{co} силового управляемого преобразователя, в качестве которого используется широтно-импульсный преобразователь, и звена $W_{e1}(p)$, как правило, на порядок меньше постоянных T_1 , T_2 . Сумма T_e и T_{co} может рассматриваться как «малая» постоянная времени: $T_\mu = T_e + T_{co}$.

Если электромагнитная постоянная времени ЛДПТ соизмерима с постоянными T_1 , T_2 , то в систему может быть введен внутренний замкнутый контур регулирования тока якоря, эквивалентная постоянная времени, которого будет снижена до «малой» постоянной.

При исследовании системы пренебрежем внутренней обратной связью по ЭДС в ЛДПТ, несущественно влияющей на динамические характеристики системы.

С учетом принятых допущений передаточная функция нескорректированной разомкнутой системы

$$W_{op}(p) = W_{co}(p) W_{e1}(p) k_e W_{u1}(p) k_\alpha k_{sa} = \frac{k_{op}}{(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)(T_\mu p + 1)}, \quad (12)$$

где коэффициент передачи разомкнутой системы

$$k_{op} = \frac{k_{co} k_e k_\alpha k_{sa}}{CR}.$$

При выполнении условия $T_2 / 2T_1 \geq 1$, что характерно для типичных значений параметров системы, выражение (12) преобразуется к виду:

$$W_{op}(p) = \frac{k_{op}}{(T_{03} p + 1)(T_{04} p + 1)(T_\mu p + 1)}, \quad (13)$$

где

$$T_{03,04} = \frac{T_2 \pm \sqrt{T_2^2 - 4T_1^2}}{2}. \quad (14)$$

Синтез регулятора базируется на использовании стандартных настроек и выполняется известными методами, применяемыми при построении систем подчиненного регулирования координат [11, 12].

Для настройки системы с передаточной функцией (13) по условиям модульного оптимума следует применить пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор [13] с передаточной функцией

$$W_R(p) = \frac{(T_{R1} p + 1)(T_{R2} p + 1)}{T_{R3} p}, \quad (15)$$

постоянные времени которого выбираются по условиям:

$$T_{R1} = T_{03}; \quad T_{R2} = T_{04}; \quad T_{R3} = 2k_{op} T_\mu. \quad (16)$$

Расчеты и моделирование проведены для одного из идентичных каналов управления и следующих параметров элементов системы: $m = 250$ кг, $C = 25000$ Н/м,

$T_1 = 0,1$ с, $T_2 = 0,2$ с, $T_\mu = 0,02$ с, $k_e = 2,4$, $h = 1,24$ м, $b = 0,72$ м.

Для принятых расчетных значений параметров эквивалентные постоянные времени объекта, рассчитанные по (14), равны $T_{03} = T_{04} = 0,1$ с.

В соответствии со структурной схемой (рис. 3), с учетом соотношений (1), (2), (4)-(11), (13)-(16) рассчитаны параметры САУ и разработана компьютерная модель системы.

Переходный процесс изменения угла крена при действии наиболее неблагоприятного

ступенчатого изменения центральной силы без системы (в разомкнутой системе) приведен на рис. 4, кривая 1.

Величина возмущающего воздействия выбрана так, чтобы установившееся отклонение угла крена в разомкнутой системе составляло 1 град.

График отработки того же возмущения в замкнутой системе приведен на рис. 4, кривая 2. Как следует из графика, максимальное динамическое отклонение угла крена примерно в 6 раз меньше установившегося отклонения в разомкнутой системе.

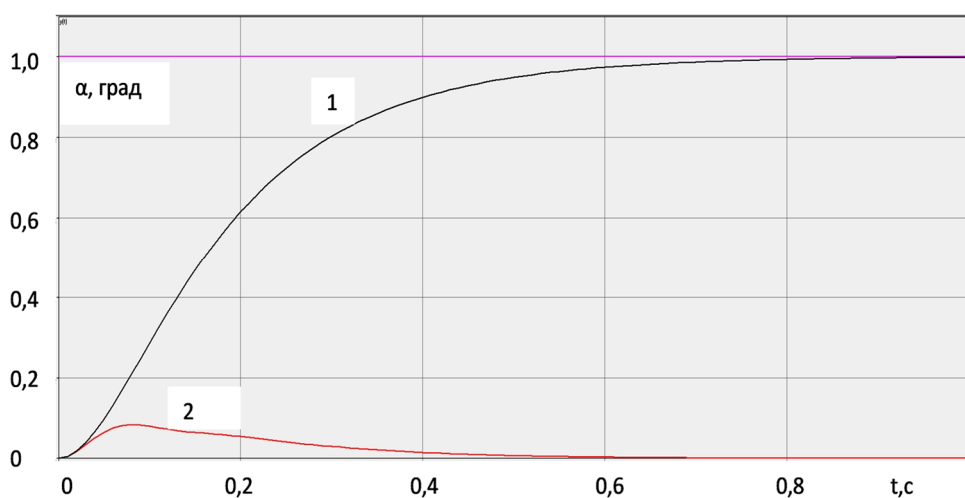


Рис. 4. Графики отработки ступенчатого возмущающего воздействия: 1 – в разомкнутой системе; 2 – в замкнутой системе с ПИД-регулятором

Как показывает анализ, переходный процесс изменения усилия исполнительного органа при отработке возмущения имеет перерегулирование порядка 10 %, что необходимо учитывать при выборе номинальных данных линейного двигателя.

Рассмотрена возможность использования в системе пропорционально-интегрального регулятора с передаточной функцией

$$W_R(p) = \frac{T_{R1} p + 1}{T_{R2} p}.$$

В этом случае за «малую» постоянную времени принимается сумма меньшей из постоянных времени объекта и T_μ . В рассматриваемом примере новая «малая» постоянная $T_{\mu 1} = T_\mu + T_{03}$ и параметры ре-

гулятора выбираются из соотношений: $T_{R1} = T_{04}$; $T_{R2} = 2k_{op} T_\mu$.

Графики переходных процессов по возмущающему воздействию для указанных выше условий в разомкнутой (кривая 1) и замкнутой системе (кривая 2) приведены на рис. 5.

Как следует из полученных результатов, упрощение регулятора приводит к существенному увеличению максимального динамического отклонения угла крена — до 0,6 единиц от установившегося отклонения в разомкнутой системе. В связи с этим использование такого регулятора может быть целесообразно только в случае, когда постоянные времени объекта управления отличаются на порядок, либо, когда отсутствуют жесткие требования к точности стабилизации угла крена.

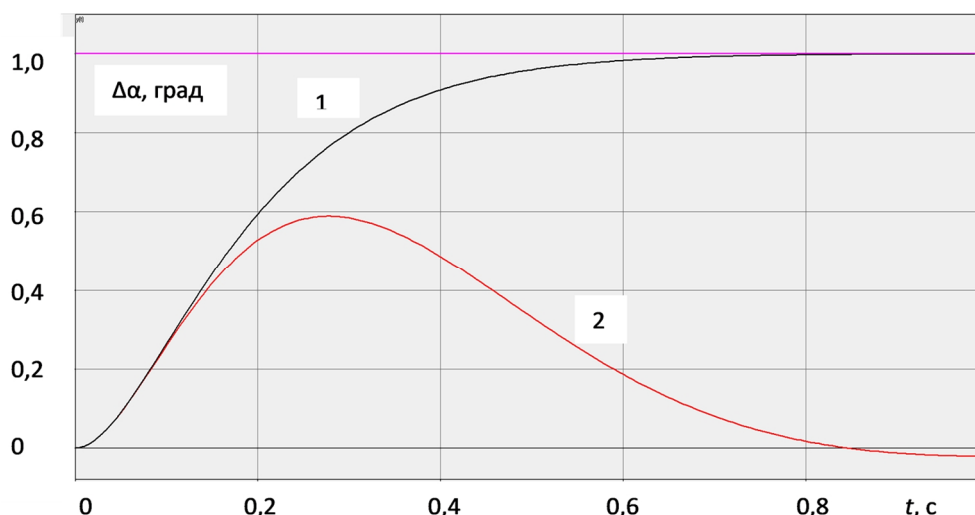


Рис. 5. Графики отработки ступенчатого возмущающего воздействия:

1 – в разомкнутой системе; 2 – в замкнутой системе с пропорционально-интегральным регулятором

Заключение

Разработана линеаризованная математическая модель объекта управления в форме операторных уравнений, устанавливающая зависимость угла крена автомобиля от центробежной силы, отличающаяся учетом упруго-диссипативных свойств подвески и дополнительного управляющего воздействия, создаваемого ЛДПТ. Математическая модель объекта управления по каналам управления и возмущения в замкнутой САУ углом крена автомобиля с использованием в активной подвеске ли-

нейного двигателя постоянного тока получена в форме передаточных функций звеньев второго порядка. Разработана структурная схема САУ и проведен синтез регулятора по условиям настройки на модульный оптимум. Результаты моделирования САУ показали, что динамическое отклонение стабилизируемой координаты в замкнутой системе с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором снижается примерно в 6 раз по сравнению с установившимся отклонением в разомкнутой системе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Волченко Т.С.** Оптимизация параметров виброзащиты грузовых автотранспортных средств по критерию минимума динамических нагрузок: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ). Челябинск, 2014.

2. **Попов А.В., Горбунов А.А.** Выбор типа активной системы стабилизации поперечной устойчивости при проектировании автомобильных транспортных средств // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 8. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/08/70289> (дата обращения: 28.07.2022).

3. **Тягунов А.Е., Карташов А.Б.** Расчет и обоснование конструктивных параметров

автомобильных механических стабилизаторов поперечной устойчивости с регулируемой жесткостью // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. Т. 11. № 2 (32). С. 64-71.

4. **Абакумов А.М., Рандин Д.Г., Бочков В.В.** Исследование активной системы виброзащиты на основе линейного двигателя постоянного тока // Вестник Самарского государственного технического университета. 2018. № 3 (59). С. 118-128.

5. Investigation of vehicle stability with consideration of suspension performance / V. Lukoševičius, R. Makaras, A. Rutka, R. Kersys // Applied sciences. October 2021. Vol. 11. 9778. № 20. P. 1-32.

6. **Сазонов И.С., Ким В.А., Ки Йонг Чой.** Теория автомобиля: учеб. пособие.

Могилев: ГУВПО «Белорусско-Российский университет», 2017. 164 с.

7. **Селифонов В.В., Хусаинов А.Ш., Ломакин В.В.** Теория автомобиля: учеб. пособие. Москва: МГТУ «МАМИ», 2007. 102 с.

8. **Апресов С., Мамонтов Д., Черняускас В.** Незримая опека // Популярная механика. Январь 2011. № 1 (99).

9. Design and control of active vibration isolation system with an active dynamic vibration absorber operating as accelerometer / S.M.R. Rasid, T. Mizuno, Y. Ishino et al. // Journal of sound and vibration. January 2019. Vol. 438. P. 175-190.

10. **Рапопорт Э.Я.** Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Куйбышев: КПТИ, 1985. 56 с.

11. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Система управления электроприводов: учебник. 2-е изд., стер. Москва: ИЦ «Академия», 2003. 304 с.

12. **Чичварин А.В.** Динамика активной системы виброизоляции с механизмами параллельной структуры: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». Орел, 2006.

13. PID controller of active suspension system for a quarter car model / A.E.N.S. Ahmed, A.S. Ali, N.M. Ghazaly, G.T. Abd el-Jaber // International journal of advances in engineering & technology. December 2015. Vol. 8. № 6. P. 899-909.

Абакумов Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Горячкин Александр Александрович – аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Рандин Дмитрий Геннадьевич – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksander M. Abakumov – Dr.Sci. Tech., Honorary Worker of Higher Professional Education, Corresponding member of the Russian Engineering Academy, Professor, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

Aleksander A. Goryachkin – Postgraduate, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

Dmitriy G. Randin – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 17.02.23, принята к опубликованию 14.03.23

УДК 621.315

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА НА КПД СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

В.М. Завьялов, С.В. Гайдук, С.А. Абейдулин, М.Б. Углова

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RESONANT CIRCUIT PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF A WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEM

V.M. Zavyalov, S.V. Gaiduk, S.A. Abeidulin, M.B. Uglova

Рассматривается система беспроводной передачи энергии (БПЭ) с последовательной топологией, как наиболее устойчивая к возмущениям и обеспечивающая высокий коэффициент передачи мощности. Описана её математическая модель во временной области. Получены зависимости КПД и коэффициента передачи мощности от параметров резонансного контура при фиксации резонансной частоты и при ограничениях габаритов передающих катушек. Для экспериментальной установки системы БПЭ с последовательной топологией, разработанной для электротележки ET-20132, оборудованной беспроводной зарядной станцией, при учете реальных параметров построены графические зависимости, отражающие связь КПД с параметрами системы. Приведён анализ полученных зависимостей.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, коэффициент полезного действия, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), робастность, последовательная топология, эффективность передачи

Введение

В последнее время активно развиваются системы БПЭ. Эти технологии в мировой практике оказались очень полезными для различных областей техники и медицины, так в [1] рассмотрены вопросы БПЭ для электротранспорта, в [2] – для портативной

A wireless power transmission (WPT) system with a serial topology is considered as the most resistant to disturbances and providing a high power transfer coefficient. Its mathematical model in the time domain is described. The dependences of efficiency and power transfer coefficient on the parameters of the resonant circuit are obtained at fixing the resonant frequency and with restrictions on the dimensions of the transmitting coils. For experimental installation of the WPT system with a serial topology developed for the electric cart ET-20132, and equipped with a wireless charging station with account for the actual parameters, graphical dependencies were constructed that reflect the relationship between efficiency and system parameters. The limiting values of the parameters are found at which a strong coupling becomes weak and a sharp decrease in efficiency is observed. The analysis of the obtained dependences is given.

Keywords: wireless power transmission, efficiency, frequency response, robustness, serial topology, transmission efficiency

электроники, в [3] – для беспилотных летательных аппаратов, в [4] – для биомедицинских имплантируемых устройств, в [5] – для подводной беспроводной системы передачи энергии.

В связи с тем, что технологий БПЭ достаточно много, их анализ приведён в [6],

будем рассматривать метод электромагнитной индукции, который основан на одноимённом явлении. Передача энергии осуществляется посредством воздушного трансформатора. Высокую эффективность передачи энергии обеспечивает близкое расположение обмоток. Данный способ, применяется для зарядки мобильных устройств, медицинских имплантатов, электромобилей. Рост областей применения БПЭ, способствует исследованию вопросов о способах увеличения эффективности передачи энергии, а именно: увеличение КПД, увеличение максимальной передаваемой мощности при ограничениях на величину напряжения первичного источника энергии.

Актуальность исследования

Вопросы о влиянии параметров системы БПЭ, топологии ее элементов на эффективность передачи энергии были рассмотрены в научных статьях [4, 7-9]. Так, влияние углового и поперечного смещения передающей и принимающей катушек было исследовано в работе [1]. В [4] установлено, что отдаваемая мощность зависит от параметра, характеризующего угол ориентации катушек. Вопрос определения КПД передачи мощности изложен в работах [1, 10]; так, в [1] за счёт подстройки резонансной частоты изменением емкости конденсаторов резонансного контура добились КПД передачи мощности 91,13 %, в [10] в рамках теории двухпортовых сетей выполнена оптимизация мощности, подаваемой на нагрузку, для системы беспроводной передачи энергии двумя катушками с последовательной топологией. Рассмотренный метод двустороннего согласования обеспечивает наилучшую выходную мощность, особенно в режимах слабой связи, при этом величина КПД достигает 80 %. Одним из способов повышения эффективности является регулирование коэффициента связи между катушками, это изложено в работе [2]. В [11] определено, что выходная мощность системы может быть увеличена за счет подавления расщепления частоты, при этом КПД передачи увеличилось на 8 %.

Более широкий вопрос, а именно, эффективность передачи мощности, исследован в работах [3, 5, 7, 12]. Усовершенствованная 4-катушечная резонансно-связанная система, использующая принцип максимальной передачи мощности, рассматривается в [12], а в [13] **показано, как система с тремя катушками работает с удвоенной эффективностью.** Исследование зависимости эффективности передачи энергии от нагрузок с фиксированной частотой изложено в [16], для поддержания этого показателя более высоким при передаче в широком диапазоне, предлагается система БПЭ с переключением нескольких петлевых катушек разных размеров. Алгоритм управления, который способен оптимизировать принимаемую мощность, изложен в [3]. Для оценки максимальной мощности в рамках конструктивных особенностей оборудования в [13, 14] предлагаются вариации, способные повысить эффективность передачи. Так, в [14] рассматривается влияние добротности катушек на эффективность передачи. В [15, 16] обсуждается применение новых материалов для увеличения эффективности передачи. В [17] показано, что эффективность передачи мощности зависит от значения коэффициента связи индуктивных соединений, регулируя коэффициент связи между катушками можно оптимизировать производительность системы [2]. Применение резонаторов для увеличения КПД рассматривается в [15, 16]. Новый резонатор предлагают в [15], который может уменьшить утечку магнитного поля с помощью ферритовой пластины и соответственно увеличить эффективность передачи энергии. В [17] разработана стратегия управления с обратной связью по состоянию, что может увеличить передачу мощности системы на 10 %.

Итак, в секторе беспроводной передачи энергии технология магнитного резонанса продолжает своё развитие. Эффективность передачи увеличилась с 70 % до более чем 95 %, при этом расстояние передачи увеличилось с нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Анализ подходов к оптимизации КПД показал,

что вопрос о влиянии соотношения индуктивной и емкостной составляющей резонансного контура, обеспечивающих фиксированную резонансную частоту, в условиях ограничений на габариты катушек в настоящее время должным образом не исследован.

Постановка задачи исследования

При разработке систем БПЭ, как правило, сталкиваются с техническими ограничениями, наиболее явными из которых являются габаритные размеры катушек резонансного контура, участвующих в передаче энергии, а также диапазон частот, в котором осуществляется передача энергии. В этих условиях для обеспечения резонанса подбираются соотношения ин-

дуктивностей и емкостей. Учитывая, что резонансную частоту можно обеспечить при разных соотношениях параметров, целесообразно оценить влияние этого соотношения на КПД и выбирать то, которое обеспечит минимум потерь при передаче энергии. Вопросу анализа влияния параметров на величину КПД посвящена данная статья.

Объект исследования

В качестве исследуемой системы БПЭ будем рассматривать схему с S-S (последовательной) топологией [18-20], приведенную на рис. 1, так как она обеспечивает большой коэффициент передачи мощности и обладает робастностью резонансной частоты по отношению к взаимной индуктивности.

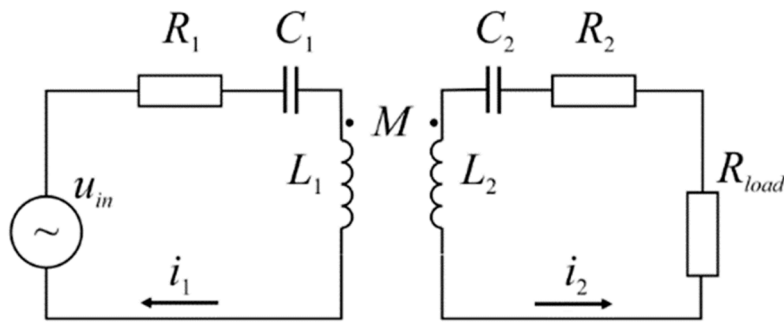


Рис. 1. Схема беспроводной зарядной станции с S-S топологией

Математическую модель во временной области представим системой уравнений:

$$\begin{cases} u_{c_1} + i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = u_{in}; \\ u_{c_2} + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_2 R_{\Sigma} = 0; \\ C_1 \frac{du_{c_1}}{dt} = i_1; \\ C_2 \frac{du_{c_2}}{dt} = i_2. \end{cases} \quad (1)$$

где u_{in} – входное напряжение; u_{c_1} – напряжение на конденсаторе в первичной цепи; u_{c_2} – напряжение на конденсаторе во вторичной цепи; i_1 – ток первичной цепи; i_2 – ток вторичной цепи; R_1 , R_2 , C_1 , C_2 – сопротивления и емкости первичной

и вторичной цепей; R_{load} – эквивалентное сопротивление аккумуляторной батареи; L_1 , L_2 – индуктивности первичной и вторичной катушек; M – взаимная индуктивность; $R_{\Sigma} = (R_2 + R_{load})$.

В математической модели приняты следующие допущения:

- не учитываются потери в конденсаторах;
- не учитываются реальные характеристики инвертора;
- источник питания идеальный;
- нагрузка представлена активным сопротивлением, величина которого определяется из номинальных значений тока и напряжения для заряда аккумуляторной батареи;
- не учитывается эффект вытеснения тока в проводниках (поверхностный эффект).

Математическая постановка задачи

При технической реализации системы беспроводной зарядной станции, можно осуществлять передачу энергии, обеспечивающей требуемую мощность нагрузки, при различных параметрах системы, таких как: резонансная частота, соотношение величин индуктивности и емкости элементов резонансного контура, взаимная индуктивность. Очевидно, что при различных величинах и соотношениях данных параметров будет изменяться КПД передачи мощности системы БПЭ. Для анализа влияния параметров системы на КПД целесообразно получить его зависимость в функции от параметров системы. Выразим КПД в виде следующей зависимости:

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{I_2^2 R_{load}}{I_1^2 \operatorname{Re}(\underline{Z}_{in})}, \quad (2)$$

где P_{load} – мощность, отдаваемая в нагрузку; P_{in} – активная мощность, потребляемая от внешнего источника; I_2 – действующее значение тока вторичной цепи; I_1 – действующее значение тока первичной цепи; $\operatorname{Re}(\underline{Z}_{in})$ – действительная часть входного комплексного сопротивления, где $\underline{Z}_{in} = \frac{U_{in}}{I_1}$.

Для приведения данной функции к параметрическому виду воспользуемся методом передаточных функций. Применив преобразования Лапласа, получим математическую модель:

$$\begin{cases} U_{C1}(s) + I_1(s)R_1 + sI_1(s)L_1 + sI_2(s)M = U_{in}(s); \\ U_{C2}(s) + sI_2(s)L_2 + sI_1(s)M + I_2(s)R_{2\Sigma} = 0; \\ sU_{C1}(s)C_1 = I_1(s); \\ sU_{C2}(s)C_2 = I_2(s). \end{cases} \quad (3)$$

Примем в качестве входной величины напряжение источника, а в качестве выходной – ток нагрузки, изобразим структурную схему системы, как это показано на рис. 2.

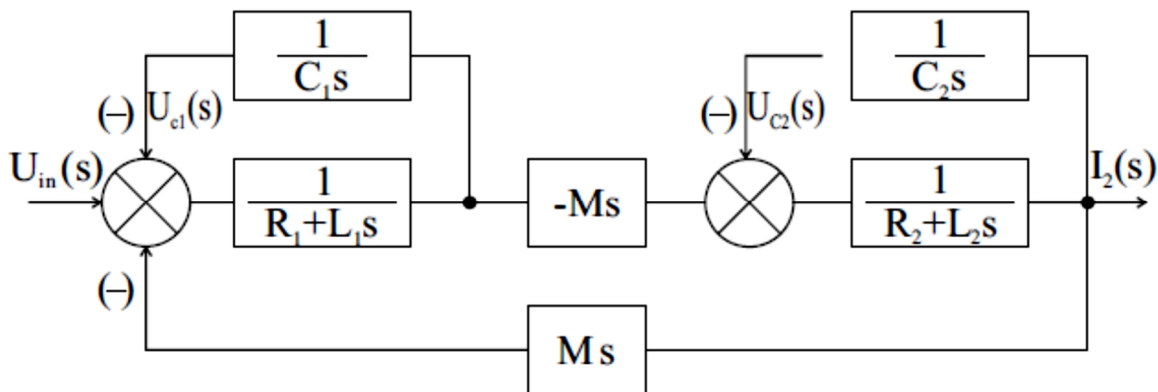


Рис. 2. Структурная схема, по току нагрузки

На основании (3) получим уравнение передаточной функции:

$$W_{i2}(s) = \frac{I_2(s)}{U_{in}(s)} = -\frac{s^3 a_1}{s^4 b_4 + s^3 b_3 + s^2 b_2 + s b_1 + 1}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= C_1 C_2 M; \quad b_1 = C_1 R_1 + C_2 R_2; \quad b_2 = C_1 C_2 R_1 R_2 + C_1 L_1 + C_2 L_2; \\ b_3 &= C_1 C_2 (R_1 L_2 + R_2 L_1); \quad b_4 = C_1 C_2 (L_1 L_2 - M^2). \end{aligned}$$

Выполним переход в комплексную плоскость; выразим передаточную функцию через циклическую частоту, выделив действительную и мнимую части:

$$W_{i2}(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{U_{in}(j\omega)} = \operatorname{Re}(W_{i2}(j\omega)) + j \operatorname{Im}(W_{i2}(j\omega)), \quad (4')$$

где

$$\operatorname{Re}(W_{i2}(j\omega)) = \frac{\omega^3 a_1 (\omega b_1 - \omega^3 b_3)}{(\omega^3 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2},$$

$$\operatorname{Im}(W_{i2}(j\omega)) = \frac{-\omega^3 a_1 (\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)}{(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2}.$$

Данное уравнение можно рассматривать как переходную проводимость для входного напряжения по отношению к току нагрузки. Ток нагрузки из (4') можно представить в виде

$$I_2(j\omega) = U_{in}(j\omega) W_{i2}(j\omega) = U_{in}(j\omega) (\operatorname{Re}(W_{i2}(j\omega)) + j \operatorname{Im}(W_{i2}(j\omega))).$$

Значение первого множителя в числителе выражения (2), необходимого для расчета КПД, можно представить в виде соотношения $I_2^3 = U_{in}^2 A_{i2}^2$, приняв $U_{in}(j\omega) = U_{in} e^{j0}$,

где A_{i2} – АЧХ передаточной функции по току нагрузки:

$$A_{i2} = \sqrt{\operatorname{Re}(W_{i2}(j\omega))^2 + \operatorname{Im}(W_{i2}(j\omega))^2}. \quad (5)$$

Мощность, отдаваемая в нагрузку, будет определяться выражением $P_{load} = U_{in}^2 A_{i2}^2 R_{load}$.

Для определения активной мощности, потребляемой от внешнего источника, воспользуемся передаточной функцией для тока первичной цепи. Структурная схема, где входной параметр напряжение источника, а выходной – ток первичной цепи, изображена на рис. 3.

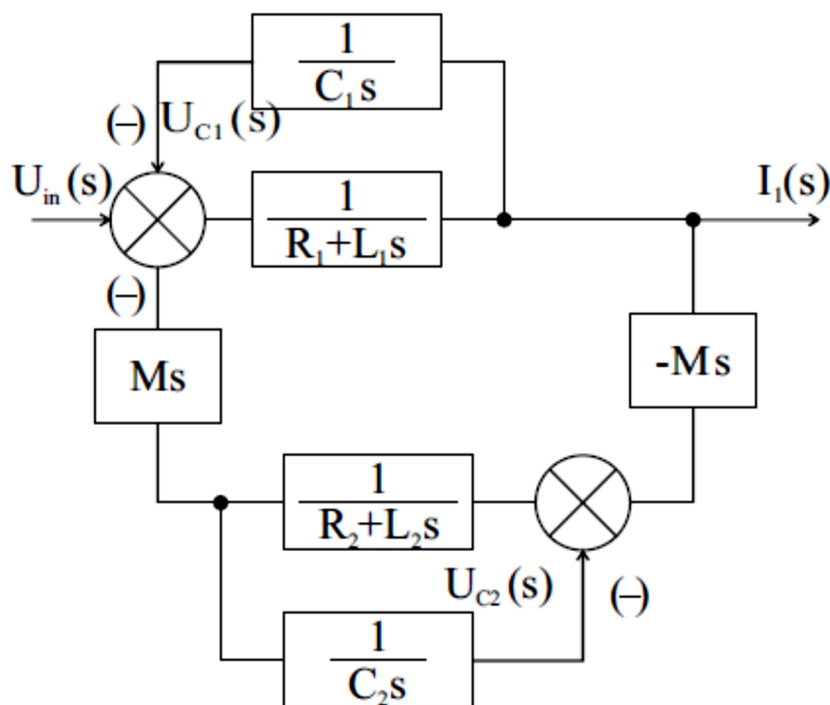


Рис. 3. Структурная схема по току первичной цепи

Получим передаточную функцию:

$$W_{il}(s) = \frac{I_1(s)}{U_{in}(s)} = \frac{(s^3 a_2 + s^2 a_3 + s) a_4}{s^4 b_4 + s^3 b_3 + s^2 b_2 + s b_1 + 1},$$

где $a_2 = C_2 L_2$; $a_3 = C_2 R_2$; $a_4 = C_1$. Переведем передаточную функцию в частотную область, получим комплексную проводимость входной цепи:

$$W_{il}(j\omega) = \frac{I_1(j\omega)}{U_{in}(j\omega)} = \text{Re}(W_{il}(j\omega)) + j \text{Im}(W_{il}(j\omega)),$$

где

$$\text{Re}(W_{il}(j\omega)) = \frac{a_4(\omega - \omega^3 a_2)(\omega b_1 - \omega^3 b_3) - \omega^2 a_3 a_4(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)}{(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2},$$

$$\text{Im}(W_{il}(j\omega)) = \frac{a_4(\omega^3 a_2 - \omega)(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1) + \omega^2 a_3 a_4(\omega b_1 - \omega^3 b_3)}{(\omega^4 b_4 - \omega^2 b_2 + 1)^2 + (\omega b_1 - \omega^3 b_3)^2}.$$

Активная мощность входной цепи имеет вид

$$P_{in} = U_{in}^2 \text{Re}(W_{il}(j\omega)).$$

КПД системы можно представить в виде функции от её параметров:

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{U_{in}^2 A_{i2}^2 R_{load}}{U_{in}^2 \text{Re}(W_{il}(j\omega))} = \frac{A_{i2}^2 R_{load}}{\text{Re}(W_{il}(j\omega))}. \quad (6)$$

Оптимизация параметров системы БПЭ

С использованием полученных зависимостей КПД (6) и АЧХ по току нагрузки (5) были построены графики $\eta = \eta(\omega)$, $A_{i2} = A_{i2}(\omega)$ – функции от угловой частоты.

Зависимость $A_{i2} = A_{i2}(\omega)$, отражающая коэффициент передачи по току нагрузки имеет два ярко выраженных максимума, соответствующих резонансным частотам. Максимум КПД при этом приходится на частоту, обеспечивающую минимум функции A_{i2} на промежутке между резонансными частотами.

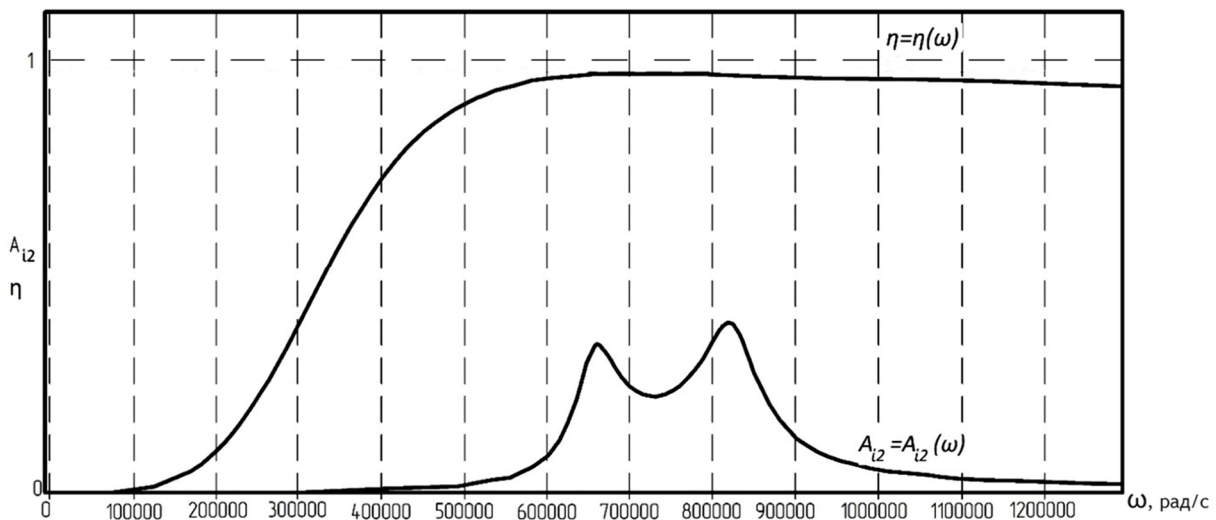


Рис. 4. Зависимости функций $\eta = \eta(\omega)$ и $A_{i2} = A_{i2}(\omega)$

Для оптимизации параметров резонансного контура выразим все параметры через индуктивность катушек. В качестве ограничений геометрических размеров примем

прямоугольное поле размером 0,6×0,3 м, что соответствует свободной области для размещения катушки на электротележке ЕТ-20132, как это показано на рис. 5.



Рис. 5. Место расположения катушки приемника

Для данного размера прямоугольной катушки рассчитаны собственные индуктивности, активные сопротивления и взаимные индуктивности для расстояния между катушками 12 см при изменении количества витков от 1 до 12 с шагом в один виток. Этому диапазону количества витков соответствует величина индуктивности в пределах от 2,28 до 71,17 мкГн. По полученным данным, построены зависимости активного сопротивления и взаимной индуктивности от собственной индуктивности с последующей аппроксимацией полиномом Чебышева 3 порядка:

$$R(L) = 5 \cdot 10^3 \cdot L^3 - 7 \cdot 10^6 \cdot L^2 + 6,84 \cdot 10^2 \cdot L + 1,8 \cdot 10^{-3},$$

$$M(L) = -1 \cdot 10^7 \cdot L^3 + 2,28 \cdot 10^3 \cdot L^2 + 1,81 \cdot 10^{-1} \cdot L - 2 \cdot 10^{-7}.$$

В результате аппроксимации отклонение от расчетных значений параметров не

превысило 2 %. Опытным путем установлено, что при симметричных катушках приемника и передатчика, а также одинаковой емкости конденсаторов на приемной и передающей стороне, максимум КПД достигается на частоте $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, исходя из

чего при фиксированной частоте передачи энергии емкость можно выразить через индуктивность зависимостью $C = \frac{1}{\omega^2 L}$. По-

лученные, зависимости, позволили построить графики функций КПД $\eta = \eta(L)$ и АЧХ $A_{12} = A_{12}(L)$ на рис. 6, 7. При построении графиков принято значение сопротивления нагрузки 2,8 Ом, что соответствует номинальному зарядному току 36 А для аккумуляторных батарей электротележки при напряжении 100 В. Частота, на которой осуществляется передача энергии, принята равной 90 кГц, в соответствии с [21].

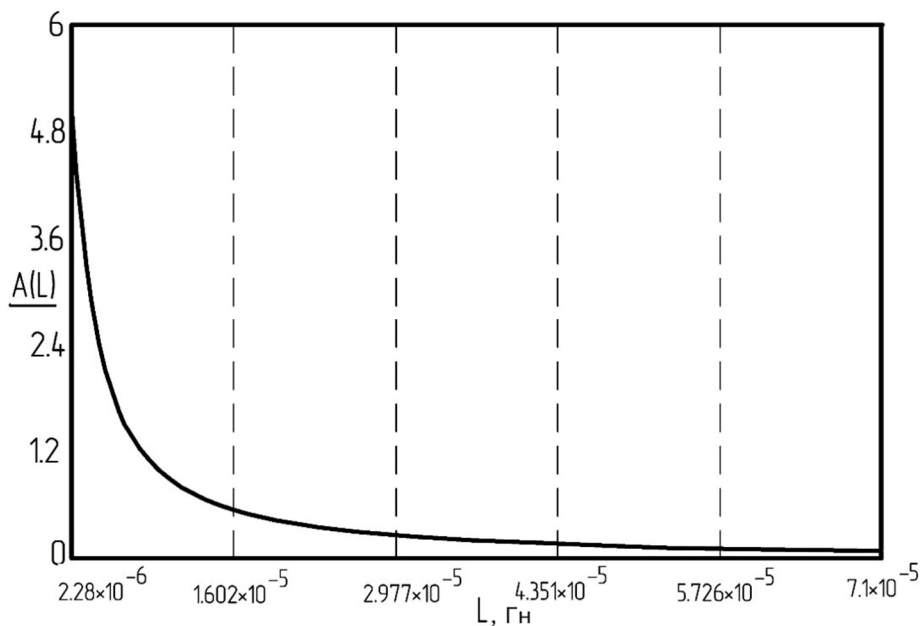


Рис. 6. График зависимости АЧХ от индуктивности

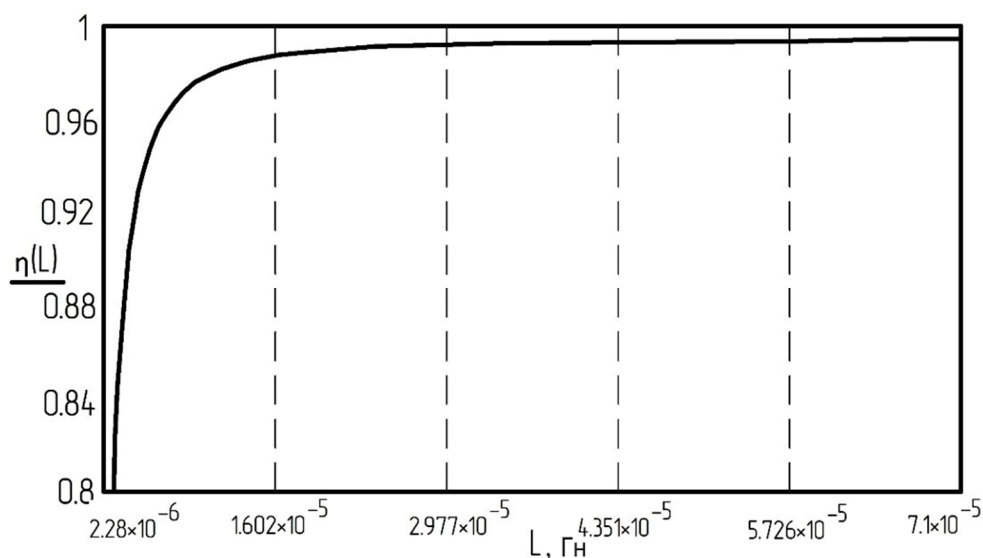


Рис. 7. График зависимости КПД от индуктивности

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что с ростом индуктивности катушек, чему соответствует увеличение количества витков, увеличивается КПД, но в тоже время уменьшается коэффициент передачи по току нагрузки. Учитывая ограничение величины питающего напряжения, коэффициент передачи по току нагрузки должен быть не ниже 0,17. Этим условиям соответствуют параметры системы БПЭ с индуктивностью 43,5 мкГн. Ближайшее для данной индуктивности является 8 витков катушки, обеспечивающие

45,16 мкГн. Емкость конденсаторов при данной индуктивности, обеспечивающая рабочую частоту передачи энергии 90 кГц, будет составлять 69 нФ.

Таким образом, полученные параметрические зависимости КПД и коэффициента передачи по току, могут быть использованы для поиска оптимального соотношения емкости конденсаторов и индуктивности катушек резонансного контура, обеспечивающие максимум КПД с ограничениями на габаритные размеры катушек, при фиксированной частоте передачи мощности.

Приведенная выше методика позволяет существенно сократить время проектирования систем БПЭ.

Заключение

В результате проведенных исследований, получены параметрические зависимости КПД и коэффициента передачи по току нагрузки для системы БПЭ с S-S топологией. На базе зависимостей выявляе-

но, что соотношение емкости конденсаторов и индуктивностей катушек, обеспечивающее постоянную частоту передачи энергии, влияет на КПД резонансного контура системы БПЭ. На основании проведенных исследований, предложена методика оптимизации по максимуму КПД резонансного контура, в условиях габаритных ограничений на катушки, обеспечивающие передачу энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Fatih Issi, Orhan Kaplan.** Design and application of wireless power transfer using Class-E inverter based on adaptive impedance-match in network // *ISA Transactions*. 2022. Vol. 126. P. 415-427.
2. Efficiency analysis of wireless power transmission for portable electronics / Xingping Xu, Chuanxiang Yu, Yuxin Zhang, Man Zhang, Haotian Hu // *International conference on engineering technology and application*. 2015. Vol. 22. P. 6.
3. **Griffin B., Detweiler C.** Wireless power transfer to ground sensors from a UAV / *IEEE International conference on robotics and automation*. River Centre, Saint Paul, Minnesota, USA May 14-18. 2012.
4. Magnetolectric wireless power transfer for biomedical implants: Effects of non-uniform magnetic field, alignment and orientation / Binh Duc Truong, Erik Andersen, Curtis Casados, Shad Roundy // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 316.
5. Pantic: review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles / Chakridhar Reddy Teeneti, Student Member, Tadd T. Truscott, David N. Beal // *Member, Journal of oceanic engineering*. 2021. Vol. 46. P. 68.
6. **Гайдук С.В., Завьялов В.М.** Анализ технологии беспроводной передачи энергии // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: материалы Междунар. конф. Севастополь, 20-23 сентября 2021 г.* С. 2021. С. 136-141.
7. **Pichona L.** Electromagnetic analysis and simulation aspects of wireless power transfer in the domain of inductive power transmission technology // *Journal of electro-*
8. magnetic walled and application. 2020. Vol. 340. № 13. P. 1719-1750.
8. **Xiaolin Mou, Hongjian Sun.** Wireless Power Transfer: Survey and Roadmap // *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* 11-14 May 2015. Vol. 1.
9. **Pengfei Gao, Zijian Tian, Tao Pan.** Transmission efficiency analysis and optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system with misalignments // *Cite as: AIP*. 2018. Vol. 8.
10. **Binh Duc Truong.** Investigation on power optimization principles for series-configured resonant coupled wireless power transfer systems // *AEU – International journal of electronics and communications*. 2019. Vol. 106. P. 67-81.
11. Optimization method of magnetic coupling resonant wireless power transfer system with single relay coil / Jianpo Li1, Yang Lu, Fuxin Liu, Baochun Mu3, Ziqi Dong, Songjun Pan, and Cong Zheng // *Progress in electromagnetics research M*. 2019. Vol. 80. P. 57-70.
12. Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications / Surajit Das Barmana, Ahmed Wasif, Rezaa Narendra, Kumara Md, Ershadul Karimb Abu Bakar Munir // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015. Vol. 51. P. 1525-1552.
13. Analysis and design of a 3-coil wireless power transmission system for biomedical applications / Manjunath Machnoor, Erik Saturnino Gámez Rodríguez, Pragya Kosta, John Stang, Gianluca Lazzi // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 2018. Vol. 67. № 8.

14. **Stephan Schaecher, Matthias Brandl.** Resonant wireless power transfer // White Paper. 2018. № 5.

15. Design of a loop resonator with improved power transmission efficiency using a ferrite plate / Gangil Byun, Sunghwan Ji, Byungjun Jang, Chulhun Seo, Hosung Choo // Journal of electromagnetic analysis and applications. 2013. Vol. 5.

16. **Wang B., Yerazunis W., Teo K.H.** Wireless power transfer: metamaterials and array of coupled resonators // Mitsubishi electric research laboratories, Inc. 2013. Vol. 10. № 6. P. 1359-1368.

17. Optimization of wireless power transmission for two port and three port inductive link / Samnan Haider, Hasmah Mansor, Sheroz khan, Atika Arshad, Mohammed M. Shobaki and Rumana Tasnim // 5th International Conference on Mechatronics (ICOM'13) IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 53 2013.

18. **Wei Zhang, Chunting Chris Mi.** Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2016. Vol. 65. № 6. P. 4768-4778.

19. Challenges and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: a review / S. Jay W. Zhang, C.C. Mi, Design // IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics. 2021. Vol. 9. № 5. P. 6196-6218.

20. Criteria for choosing of resonant circuit parameters of wireless power transfer charging system / V.M. Zavylov, I.Y. Semykina, S.A Abeidulin, E.A. Dubkov, A.S. Veliliaev // Iranian journal of electrical and electronic engineering. 2022. Vol. 18. № 1. P. 2236.

21. SAE International wireless power transfer for light-duty plug-in // Electric vehicles and alignment methodology (J2954_201904). SAE International: Warrendale, PA, USA. 23 April 2019.

Завьялов Валерий Михайлович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы атомных станций» Института ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета

Гайдук Светлана Владимировна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы атомных станций» Института ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета

Абейдулин Сергей Адельзанович – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы атомных станций» Института ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета

Углова Марина Борисовна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы атомных станций» Института ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета

Valery M. Zavyalov – Dr.Sci. Tech., Associate Professor, Head: Department of Electric Systems for Nuclear Power Plants of the Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University

Svetlana V. Gaiduk – Senior Lecturer, Department of Electric Systems for Nuclear Power Plants of the Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University

Sergey A. Abeidulin – Senior Lecturer, Department of Electric Systems for Nuclear Power Plants of the Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University

Marina B. Uglova – Senior Lecturer of the Department of Electric Power Systems of Nuclear Power Plants of the Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University

Статья поступила в редакцию 07.02.23, принята к опубликованию 06.03.23

УДК 621.316.1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДАХ ВЛ-10(6) КВ

С.П. Максимов, П.А. Кузнецов

EXISTING METHODS FOR MELTING ICE AND SNOW ACCRETION ON 10(6) KV POWER LINES

S.P. Maksimov, P.A. Kuznetsov

Проведен обзор текущего состояния и аварийности на воздушных линиях электропередачи 10(6) кВ. Выявлены основные причины аварийности – гололедная и ветровая нагрузка на провода ВЛ, а также основные факторы, усложняющие проведение плавки гололеда. Приведен сравнительный анализ применяемых методов плавки гололеда. На основе результатов анализа сформулированы технические требования для создания нового, более эффективного метода плавки гололеда на ВЛ-10(6) кВ.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, плавка гололеда, распределительная сеть электроснабжения 10(6) кВ

The paper presents a review of the current state and accident rate on 10(6) kV overhead power lines. The authors consider the main reasons for accidents associated with ice and wind loads on overhead power lines, as well as the key disruptive effects which complicate the ice melting events. A comparative analysis of the employed ice melting techniques is provided. The results of the study are used to formulate the technical requirements for a novel ice-melting technique for the 10(6) kV overhead power lines.

Keywords: overhead power line, ice and snow accretion, ice-melting, 10(6) kV power distribution network

Введение

Воздушные линии электропередачи напряжением 10(6) кВ на данный момент составляют большую долю электросетевого комплекса России. Их суммарная протяженность значительно превышает суммарную протяженность ВЛ 35-500 кВ. Так, например, в распоряжении филиала ПАО «Россети Волга» – Саратовские распределительные сети находится 54,1 тыс. км ВЛ 0,4-220 кВ, из них 44,6 % длины составляют ВЛ 10(6) кВ [1]. Они питают 9606 трансформаторных пунктов напряжением 10(6)/0,4 кВ. Эксплуатация ВЛ 10(6) кВ является одной из самых трудозатратных работ электросетевых организаций из-за большой протяженности ВЛ.

1. Анализ повреждаемости ВЛ-10(6) кВ

Эксплуатация ВЛ 10(6) кВ связана с повышенной аварийностью, обусловленной зачастую неудовлетворительным техническим состоянием линий в связи с недостатком их обслуживания и ремонта, чрезмерным сроком их эксплуатации (многие ВЛ построены в 1950-е–1970-е годы) и недостаточными темпами реконструкции. В дополнение к этому ВЛ подвержены воздействиям гололедно-ветровых нагрузок, которые превышают значения, на которые эти ВЛ были рассчитаны. В результате на ВЛ-10(6) кВ случаются гололедно-ветровые аварии, влекущие за собой недоотпуск электроэнергии и существенные материальные ущербы. Высокая повреждаемость

ВЛ 6-10 кВ по сравнению с ВЛ 35-110 кВ некоторыми авторами объясняется их конструктивными особенностями: короткие пролеты, малые сечения проводов и стрелы их провеса, незначительные межфазные расстояния между проводами, малая крутильная жесткость проводов, большая регулировка их стрел провеса в пролете, возникающая в ходе эксплуатации, жесткое крепление проводов на штыревых изоляторах [2]. Наиболее тяжелыми и затратными повреждениями являются разрушения опор, влекущие за собой обрывы проводов и разрушения соседних опор: 19,9 % аварийных отключений по количеству и 28,1 % по длительности [3, 4]. Аварийные отключения из-за повреждения опор и приставок возникают при воздействии значительных ветровых нагрузок (49,7 %), гололедно-изморозевых (19,3 %), грозových разрядов молнии, вызывающих расщепление или возгорание верхней части деревянных опор (23,0 %) и наезде транспортных средств (8,0 %). Самые тяжелые и сложноустраняемые аварии, как следствие, возникают в осенне-зимний период и связаны с гололедно-ветровыми воздействиями на ВЛ. Существуют различные способы борьбы с гололедно-изморозевыми отложениями (ГИО), но наиболее эффективным способом борьбы на сегодняшний день является плавка гололеда путем нагрева фазных проводов и тросов электрическим током [5].

2. Электрические способы борьбы с гололедом

Электрические способы заключаются в тепловом воздействии электрического тока. Ток вызывает нагрев провода (троса) и, в свою очередь, нагрев и плавление муфты ГИО.

Существует два основных электрических способа борьбы с гололедом: плавка гололеда и профилактический подогрев [5]. Плавка гололеда производится по факту отложения гололеда. При плавке требуется ток высокой величины нагреть провод до 0 °С, а затем проплавить муфту ГИО. Профилактический подогрев производится по-

вышенным током за некоторое время до возможного отложения гололеда, при обнаружении возможности гололедообразования. При этом задача стоит в нагреве провода до некоторой повышенной температуры, при которой образования гололеда не происходит.

По роду тока плавки (профилактического подогрева) выделяют:

- плавку переменным током промышленной частоты;
- плавку постоянным током;
- плавку током высокой и сверхвысокой частоты.

Плавку переменным током производят следующими методами:

- короткое замыкание (только плавка);
- встречное включение фаз (только плавка);
- перераспределение нагрузок (плавка и профилактический подогрев);
- наложение токов (плавка и профилактический подогрев).

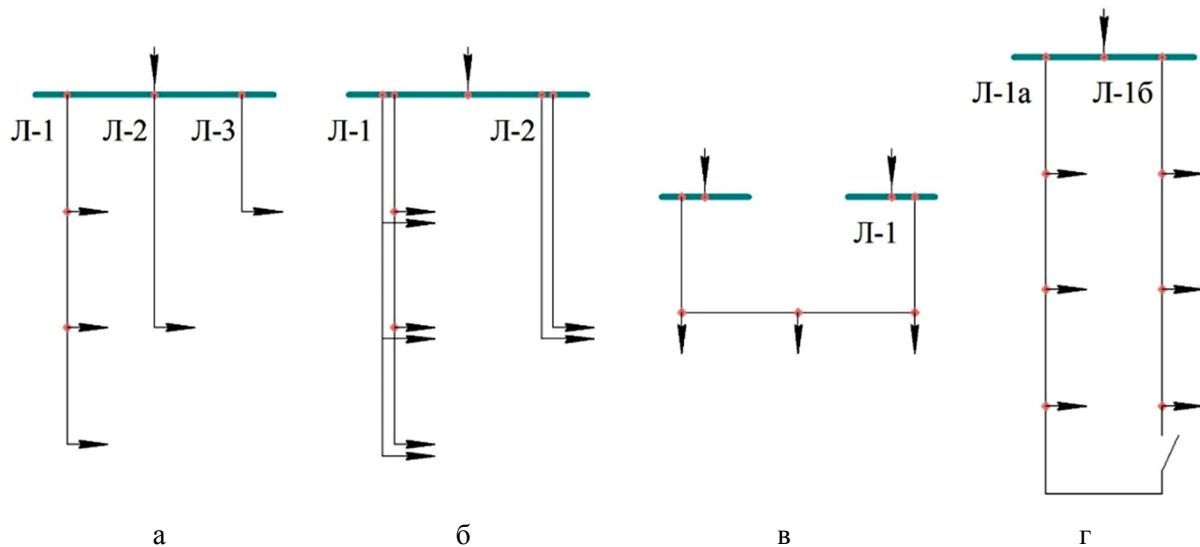
В гололедоопасных районах для ВЛ 35-500 кВ плавка гололеда – это практически отработанная методика для борьбы с ГИО, на данный момент для многих ВЛ в электросетевых организациях разработаны технологические карты плавки гололеда. На ВЛ-10(6) кВ существуют факторы, которые усложняют проведение плавки гололеда:

1) схема сети: применяются разомкнутые нерезервированные схемы с отпайками (рисунок а), разомкнутые резервированные схемы с отпайками (рисунок б), ВЛ с двухсторонним питанием (рисунок в), петлевые схемы (рисунок г) [6]. Каждая схема сети подразумевает свой метод плавки гололеда, при этом наиболее трудно организовать плавку гололеда на разомкнутой нерезервированной схеме с отпайками, так как для плавки переменным током короткого замыкания персонал должен отключить всех потребителей на ВЛ или перевести их на резервную ВЛ. В отличие от сетей напряжением 35-500 кВ, где подстанции питаются по двум и более ЛЭП, в распределительных сетях 10(6) кВ большинство трансформаторных подстанций (ТП) получают элек-

троснабжение по одной ВЛ, а значит, что на время плавки гололеда потребитель должен быть отключен от сети в большинстве случаев.

2) большая плотность ВЛ-10(6) кВ на энергорайон: ВЛ-35-500 кВ призваны передавать большую мощность на большие расстояния, чем ВЛ-10(6) кВ распределительных сетей, следовательно, количество ВЛ-35-500 кВ меньше, а значит их проще за-

щитить от влияния гололедно-ветровой нагрузки. Число ВЛ-10(6) кВ распределительных сетей выше, более того, они расположены зачастую в метеоусловиях одного энергорайона, а значит все подвержены идентичному разрушительному воздействию гололедно-ветровых нагрузок. Это ведет к увеличению трудозатрат на организацию плавки гололеда.



Схемы распределительной сети напряжением 10(6) кВ:

а – разомкнутые нерезервированные схемы с отпайками; б – разомкнутые резервированные схемы с отпайками; в – ВЛ с двухсторонним питанием; г – петлевые схемы

3) низкий уровень автоматизации: большинство трансформаторных подстанций потребителей не оснащены выключателями на стороне высокого напряжения ТП. Для отключения необходимо вручную выключить выключатели на распределительных устройствах низшего напряжения ТП, а затем отключить разъединители на вводе ТП, который зачастую наружного исполнения и находится под воздействием ГИО. На проведение этой работы затрачиваются часы, особенно в условиях метели, сильного гололеда на автодорогах и в ночное время. Риски аварий растут прямо пропорционально длительности организации плавки гололеда.

Таким образом, решения, разработанные для ВЛ-35-500 кВ, не всегда применимы для ВЛ-10(6) кВ ввиду другой схемы сети, большой плотности ВЛ в энергорайоне и низкого уровня автоматизации. Со-

стояние ВЛ-10(6) кВ не допускает чрезмерного воздействия гололедно-ветровой нагрузки ввиду малого запаса прочности. Задачу борьбы с ГИО на ВЛ-10(6) кВ необходимо решить, опираясь на уже существующие методы, проведя их анализ, а затем выработать технические требования к новому методу плавки гололеда, максимально превосходящему по эффективности существующие методы.

3. Плавка переменным током короткого замыкания и встречным включением фаз

Плавка переменным током короткого замыкания получила широкое распространение как наиболее простая и эффективная. При этом применяются следующие схемы плавки током КЗ [5]:

– трехфазное короткое замыкание;

- двухфазное короткое замыкание (фаза – фаза, фаза – две фазы);
- однофазное короткое замыкание (фаза – земля, две фазы – земля, три фазы – земля, «змейка»);
- двухфазное короткое замыкание на землю (с заземленной нейтралью; с заземленной особой фазой, отключенной от схемы плавки; с заземленной фазой, подключенной к схеме плавки).

$$I_{nl} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{III} + R_{20yd}(1 - 20 \cdot \beta) \cdot k_{cx} \cdot l_{zm} + R_{np.yd} \cdot k_{cx} \cdot l_{\delta z})^2 + (X_{III} + X_1)^2}}, \text{ кА} \quad (1)$$

где U – линейное напряжение источника питания при плавке гололеда, кВ; R_{III} – активное сопротивление источника питания, Ом; R_{20yd} – удельное активное сопротивление ВЛ при температуре +20 °С Ом/км; β – температурный коэффициент сопротивления, для практических расчетов для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов ВЛ $\beta = 0,004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$; k_{cx} – коэффициент схемы, зависящий от типа короткого замыкания (для трехфазного КЗ $k_{cx} = 1$); l_{zm} – длина участка ВЛ с гололедной муфтой, км; $l_{\delta z}$ – длина участка ВЛ без гололедной муфты, км; X_{III} – реактивное сопротивление источника питания, Ом; X_1 – реактивное сопротивление ВЛ, Ом; $R_{np.yd}$ – приведенное удельное активное сопротивление провода без гололеда, Ом/км:

$$R_{np.yd} = R_{20yd} \cdot (1 + \beta(\vartheta_e - 20)) \cdot \left(1 + \frac{90\beta I_{nl}'^2}{I_{md,\delta}^2 \sqrt{v/2}} \right), \text{ Ом/км}, \quad (2)$$

где ϑ_e – температура воздуха, °С; I_{nl}' – ток плавки, рассчитанный без учета зависимости сопротивления проводов и длины гололедной муфты, кА; $I_{md,\delta}$ – базовое значение максимально допустимого тока, нагревающего провод до максимально допустимой температуры 90 °С по условию сохранения механической прочности при базисных условиях $\vartheta_{\delta} = 0$ °С, $v_{\delta} = 2$ м/с; v – скорость ветра, м/с.

Плавка током короткого замыкания выполняется с отключением линии из работы и включением на рабочее напряжение ВЛ

При плавке гололеда на ВЛ-10(6) кВ активное сопротивление проводов, зависящее от температуры, играет большую роль, чем реактивное сопротивление, поэтому влияние температуры необходимо учитывать. Формула расчета тока плавки гололеда при трехфазном коротком замыкании с учетом влияния температуры провода:

или меньшее. Обычно включение производится через ячейку плавки гололеда. Регулирование тока плавки осуществляется ступенчато и достигается выбором напряжения и схемы источника питания, выбором схемы соединения проводов обогреваемой ВЛ, регулированием коэффициента трансформации трансформаторов, питающих ячейку.

Достоинства метода:

- доступность схемы плавки из-за отсутствия специального оборудования для ее сборки.

Недостатки метода:

- требование отключения потребителя при совершении плавки ГИО или перевод на резервное питание;
- необходимость переключений на опорных подстанциях с переходом в режим плавки;
- необходимость объезда конца и отпаек ВЛ для отключения потребителей и заземления (закорачивания) линии.

Разновидностью плавки током короткого замыкания является плавка встречным включением фаз, поскольку происходит межфазное короткое замыкание через сопротивление ВЛ. Плавка происходит уравнительными токами на трех фазах и применяется на ВЛ, соединяющих две подстанции, имеющие мощные связи по линиям высокого напряжения или параллельные линии, а также в кольцевой схеме. Зачастую встречное включение фаз создают на одном из концов линии и получают угол сдвига между фазами в 120°, что повышает

напряжение плавки с фазного до линейного. Для ВЛ-10(6) кВ такой способ плавки не применяется из-за отсутствия мощных связей по линиям высокого напряжения.

4. Плавка перераспределением нагрузок

Плавка гололеда способом перераспределения нагрузок производится путем отключения параллельно работающих линий для повышения тока в ВЛ, требующей обогрева. При этом ток плавки зависит от режима энергосистемы, поэтому не всегда возможно гарантированно обеспечить плавку гололеда из-за возможных схемных или режимных ограничений. Поэтому данный метод наиболее применим для профилактического подогрева, так как токи подогрева меньше токов плавки гололеда, а к величине тока предъявляются менее жесткие требования.

Способы обеспечения перераспределения нагрузок:

- увеличение нагрузки генераторов на электростанциях, питающих систему через обогреваемую ВЛ;
- увеличение нагрузки подстанций, питаемых по обогреваемой ВЛ;
- отключение параллельных линий;
- перевод кольцевой схемы в радиальную;
- регулирование напряжений по концам обогреваемой ВЛ за счет РПН трансформаторов.

Достоинства метода:

- отсутствие специального оборудования для нагрева проводов;
- нет отключения потребителей.

Недостатки метода:

- не работает в разомкнутых нерезервированных сетях, то есть на большинстве ВЛ;
- зачастую невозможно получить ток, достаточный для плавки гололеда, что снижает эффективность плавки и повышает риск гололедных аварий;
- необходимость объезда конца и отпаек ВЛ для переключений, что приводит к затратам времени и ресурсов.

5. Плавка наложением токов

Плавка наложением токов применяется в кольцевых (петлевых) схемах сети и

на разомкнутых резервированных ВЛ, имеющих связи в начале магистрали и в конце. При плавке кольцо рассекается, в рассечку включается вольтдобавочный трансформатор, который питается от той же шины, от которой питается цепь ВЛ. Трансформатор создает в кольце контурный ток, который накладывается на токи нагрузки. В результате, на участках кольца с наибольшим током нагрузки, направление которого совпадает с направлением контурного тока, создается наибольшее значение тока. При этом появляются участки, где ток повышается, и участки, где ток не меняется по величине, либо становится меньше. Это создает неоднородность тока, и, как следствие, нагрева проводов при плавке гололеда. Также, сложно достигнуть высоких токов, требуемых при плавке, поэтому данный способ наиболее применим для профилактического подогрева. Единственное известное авторам применение такого метода профилактического нагрева в настоящее время производится в ПАО «Камчатскэнерго» на протяженной двухцепной магистральной ВЛ с проходными подстанциями ВЛ-110 кВ Авача-Елизово-Сосновка-Приморская. Недостатком способа является его ограниченная применимость и сложность достигнуть требуемого тока плавки без лишней перегрузки других участков сети. При этом длительный профилактический подогрев в большой кольцевой сети приводит к высоким потерям электроэнергии.

Достоинства метода:

- нет отключения потребителей.

Недостатки метода:

- не работает в разомкнутых нерезервированных сетях;
- зачастую невозможно получить ток, достаточный для плавки гололеда;
- требуется специальное оборудование для плавки гололеда – вольтдобавочный трансформатор.

6. Плавка постоянным током короткого замыкания

Плавка постоянным током имеет преимущество над плавкой переменным током, поскольку на протекание постоянного тока

не влияет реактивное сопротивление ВЛ. Для равных действующих значений токов (переменного и постоянного) соотношение напряжений и мощностей:

$$\frac{U}{U_d} = \frac{S}{S_d} = \frac{Z_{ВЛ}}{R_{ВЛ}} > 1, \quad (3)$$

где U – действующее значение напряжения при плавке переменным током, кВ; U_d – выпрямленное напряжение при плавке постоянным током, кВ; S – полная мощность, потребляемая при плавке переменным током, кВА; S_d – полная мощность, потребляемая выпрямительной установкой при плавке постоянным током, кВА; $Z_{ВЛ}$ – полное сопротивление ВЛ, Ом; $R_{ВЛ}$ – активное сопротивление ВЛ, Ом.

Таким образом, плавка постоянным током тем выгоднее по затратам на электроэнергию, чем больше указанное соотноше-

ние, так как при плавке постоянным током потребляется меньшая мощность, а значит уменьшаются потери мощности (пропорционально квадрату потока мощности) и падение напряжения (пропорционально величине потока мощности) в питающей сети, уменьшается нагрузка на сеть и питающее оборудование. С увеличением напряжения ВЛ возрастает соотношение Z/R , поэтому плавка постоянным током как правило применяется на ВЛ 220 – 500 кВ, а плавка переменным током – на ВЛ 6 – 220 кВ [5]. В табл. 1 показано соотношение загрузки оборудования при плавке переменным током к загрузке при плавке постоянным током (в числителе), а также соотношение потерь в питающей сети при плавке переменным током к потерям в питающей сети при плавке постоянным током (в знаменателе).

Таблица 1 – Соотношения по загрузке оборудования и потерям в питающей сети при плавке переменным током и постоянным током

Марка провода	ВЛ-10(6) кВ	ВЛ-35 кВ	ВЛ-110 кВ	ВЛ-220 кВ	ВЛ-330 кВ	ВЛ-500 кВ
АС-35/6,2	1,12 / 1,25	–	–	–	–	–
АС-50/8	1,17 / 1,38	–	–	–	–	–
АС-70/11	1,31 / 1,71	1,42 / 2,02	1,44 / 2,08	–	–	–
АС-95/16	1,53 / 2,34	1,72 / 2,97	1,77 / 3,13	–	–	–
АС-120/19	–	1,94 / 3,76	1,98 / 3,94	–	–	–
АС-150/24	–	2,28 / 5,21	2,34 / 5,49	–	–	–
АС-185/29	–	–	2,74 / 7,51	–	–	–
АС-240/32	–	–	3,52 / 12,37	3,76 / 14,13	5,6 / 31,36	–
АС-300/39	–	–	–	4,49 / 20,16	6,9 / 47,55	9,18 / 84,21
АС-400/51	–	–	–	5,69 / 32,41	8,55 / 73,15	12,28 / 150,8
АС-500/64	–	–	–	6,95 / 48,3	10,70 / 114,49	15,25 / 232,56

По данным таблицы видно, что процесс плавки гололеда постоянным током дает значимый выигрыш относительно плавки переменным током при плавке на проводах ВЛ-35, 110 кВ сечением от 150 мм², а также ВЛ-220-500 для любой применяемой марки провода.

Ток плавки рассчитывается по формуле

$$I_d = \frac{U_d}{R_d}, \text{ кА} \quad (4)$$

где U_d – напряжение на выходе выпрямительной установки плавки гололеда, кВ; R_d – сопротивление схемы плавки ВЛ («фаза – фаза» или «фаза – 2 фазы»), Ом.

Напряжение выпрямительной установки – трехфазного мостового неуправляемого преобразователя:

$$U_d = 1,35 E_n - \frac{3}{\pi} X_k I_d, \text{ кВ}, \quad (5)$$

где E_d – линейное напряжение питающего трансформатора, кВ; X_k – индуктивное сопротивление фазы контура коммутации преобразователя, Ом.

Сопротивление схемы плавки ВЛ «фаза-фаза»:

$$R_d = 2 \frac{R_{20yd} l_{ВЛ}}{m_{np}}, \text{ Ом}, \quad (6)$$

где m_{np} – число проводов в фазе.

Сопротивление схемы плавки ВЛ «фаза-2 фазы»:

$$R_d = 1,5 \frac{R_{20yd} l_{ВЛ}}{m_{np}}, \text{ Ом}. \quad (7)$$

Учет влияния температуры на сопротивление провода и длины гололедной муфты аналогичен приведенному в формулах (1) и (2).

Плавка постоянным током требует дополнительной установки специального оборудования, поэтому применение ее для немногочисленных длинных ВЛ сверхвысокого напряжения наиболее оправдано. Так, мощность питающего источника постоянного тока для плавки ГИО на ВЛ 220 кВ и выше составляет 10-20 % от требуемой при плавке переменным током.

Выпрямительная установка для плавки гололеда (ВУПГ) состоит из:

- выпрямительного моста (обычно диодный или тиристорный, выполненный по схеме Ларионова);
- преобразовательный трансформатор с РПН;
- токоограничивающие реакторы;
- коммутационная аппаратура (выключатели, разъединители);
- комплекс релейной защиты, диагностики, определения места повреждения, измерительные трансформаторы.

Место установки ВУПГ – узловые подстанции энергосистемы. Плавка обычно производится с отключением ВЛ, но, возможно выполнить ее наложением постоянного тока на переменный, ограничив цепь протекания постоянного тока конденсаторами. ВУПГ серийно выпускаются и поставляются сетевым эксплуатирующим организациям.

Наиболее часто при плавке применяют схемы «фаза – фаза», «фаза – две фазы».

Достоинства метода:

- эффективнее чем плавка переменным током для ВЛ-10(6) кВ в 1,12-1,53 раз по нагрузке оборудования и падению напряжения в питающей сети и в 1,25-2,34 раза по потерям мощности.

Недостатки метода:

- требуется ВУПГ;
- необходимость переключений на опорных подстанциях с переходом в режим плавки;
- необходимость объезда конца и отпаек ВЛ для переключений (для ВЛ-10(6) кВ);
- требование отключения потребителя при совершении плавки ГИО или перевод на резервное питание.

7. Плавка током высокой и сверхвысокой частоты

Плавка током высокой или сверхвысокой частоты подразумевает нагрев за счет скин-эффекта, который начинает заметно проявляться при повышении частоты выше 1 кГц [7]. Явление скин-эффекта уменьшает сечение провода, по которому протекает ток высокой частоты, в результате возрастает активное сопротивление для тока высокой частоты, что приводит к нагреву. Распространения метод не получил по следующим причинам:

- нагрев производится только во внешнем слое провода, следовательно, объем нагрева меньше и меньшее количество теплоты выделяется в этом объеме при той же температуре, что и при прочих методах плавки;
- требуется мощный генератор высокой / сверхвысокой частоты;
- требуются высокочастотные заградители и конденсаторы связи.

Достоинством способа является возможность проведения плавки без отключения потребителя, разграничив зону протекания токов промышленной и высокой частоты с помощью высокочастотных заградителей и конденсаторов связи.

8. Сравнение ключевых характеристик методов борьбы с ГИО применительно к ВЛ-10(6) кВ

Исходя из общей оценки различных электрических и методов борьбы с гололе-

дом авторами выделены ключевые характеристики этих методов применительно к ВЛ-

10(6) кВ и с учетом их особенностей. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Ключевые характеристики методов борьбы с ГИО применительно к ВЛ 10(6) кВ

№ п/п	Наименование метода	Достоинства применения на ВЛ 10(6) кВ	Недостатки применения на ВЛ 10(6) кВ
1	Плавка переменным током к.з.	1) Доступность схемы	1) Требование отключения потребителя при совершении плавки ГИО или перевод на резервное питание; 2) Необходимость объезда конца и отпаяк ВЛ для переключений; 3) Необходимость переключений на опорных подстанциях
2	Плавка перераспределением нагрузок	1) Отсутствие спецоборудования; 2) Нет отключения потребителей	1) Необходимость объезда конца и отпаяк ВЛ для переключений; 2) Не работает в разомкнутых нерезервированных сетях; 3) Зачастую невозможно получить ток, достаточный для плавки гололеда, величина которого зависит от нагрузки
3	Плавка наложением токов	1) Нет отключения потребителей	1) Не работает разомкнутых нерезервированных сетей; 2) Требуется специальное оборудование для плавки гололеда; 3) Зачастую невозможно получить ток, достаточный для плавки гололеда, величина которого зависит от нагрузки
4	Плавка постоянным током	1) Регулирование тока плавки	1) Требуется ВУПГ; 2) Необходимость объезда конца и отпаяк ВЛ для переключений; 3) Необходимость переключений на опорных подстанциях 4) Требование отключения потребителя при совершении плавки ГИО или перевод на резервное питание 5) Экономическая эффективность соизмерима с плавкой переменным током короткого замыкания

Все существующие электрические методы борьбы с ГИО при условии применения их в сетях 10(6) кВ имеют существенные недостатки. Несмотря на достаточную эффективность плавки, для их осуществления в большинстве случаев (п.1 , 4 табл. 2) требуется отключение потребителей или перевод питания на резервные источники. В редких случаях (п. 2, 3 табл. 2) возможно

проведение плавки без отключения потребителей, но режим плавки при этом становится режимом профилактического подогрева с нестабильной и неуправляемой величиной тока, при которой сложно обеспечить оперативное противодействие гололедообразованию.

Все методы единообразны в том, что они требуют длительного времени подго-

товки к процессу плавки (от 1 до 3 часов) с затратами ресурсов и вовлечением персонала. Автоматизация и управляемость режимом плавки не отвечают современным требованиям, предъявляемым к системам АСУ, а возможность проведения плавки гололеда без участия человека на современном уровне даже не рассматривается.

Перспективой развития методов и систем плавки ГИО для ВЛ-10(6) кВ является создание такого нового метода плавки, в котором будут максимально использованы достоинства и минимизированы недостатки существующих методов плавки гололеда.

9. Характеристики нового эффективного метода плавки ГИО на ВЛ-10(6) кВ

На основе результатов проведенного анализа авторами установлено, что для обеспечения высокой эффективности и технологичности процесса плавки ГИО на ВЛ-10(6) кВ требуется разработка нового метода плавки. Для этого метода сформулированы следующие характеристики:

- 1) плавка гололеда без отключения потребителей;
- 2) применимость для всех видов схем сети;

3) автоматизация процесса плавки с минимизацией ресурсозатрат – в конечном итоге – с исключением участия человека;

4) сокращение времени подготовки к процедуре плавки и перехода в нормальный режим после ее окончания – в конечном итоге – сокращение до времени на автоматическое переключение оборудования;

5) управление режимом сети, то есть током плавки, напряжением, загрузкой оборудования;

6) возможность поддержания величины тока в проводах ВЛ в диапазоне от 80 до 200 % от допустимого тока провода;

7) возможность применения для ВЛ длиной до 20 км и с сечением проводов от 35 до 95 мм²;

8) обеспечение надежности электроснабжения потребителей в соответствии с Правилами устройства электроустановок, на уровне, близком к нормальному режиму работы сети.

Создание метода плавки, обладающего вышеперечисленными характеристиками, позволит не только повысить эффективность режима плавки ГИО в сетях 10(6) кВ, но и создаст предпосылки для расширения функциональных возможностей развивающейся технологии Smart Grid.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Производственный потенциал ПАО «Россети Волга» [Электронный ресурс] // Официальный сайт ПАО «Россети Волга». Режим доступа: https://www.rossetivolga.ru/ru/osnovnie_pokazateli_deyatnosti/proizvodstvennie_pokazateli/proizvodstvenniy_potentsial/ (дата обращения 05.01.2023 г.).

2. Кабашов В.Ю. Исследование причин аварийных отключений сельских ВЛ 6-10 кВ // Инновационная наука: Междунар. науч. журнал. 2017. № 04-3/2017. С. 70-73.

3. Усманов Ф.Х., Кабашов В.Ю., Максимов В.А. Анализ отключений сельских ВЛ 6-10 кВ // Электрические станции. 1980. № 8. С. 56-58.

4. Кабашов В.Ю. Анализ повреждаемости проводов сельских ВЛ 10 (6) кВ при

воздействии неблагоприятных климатических факторов // Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы: сборник статей Междунар. науч.-практ. конф. (15 мая 2015 г., г. Уфа): в 2 ч. Ч. 2. Уфа: АЭТЕРНА, 2015. С. 41-42.

5. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: учеб. пособие / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 448 с.

6. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник. Изд. 2-е. Москва: ЛЕНАНД, 2022. 600 с.

7. Пат. № 2356148 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Способ и устройство

для борьбы с гололедом на линиях электропередачи / Каганов В.И.; патентообладатель Моск. гос. институт. радиотехники,

электроники и автоматики (МИРЭА). № 2008119101/09; заявл. 15.05.2008; опубл. 20.05.2009.

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

Sergey P. Maksimov – Postgraduate, Department of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Project engineer, STC Instrument-micro LCC

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»

Pavel A. Kuznetsov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Technical Director, STC Instrument-micro LCC

Статья поступила в редакцию 15.02.23, принята к опубликованию 15.03.23

УДК 621.31

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОРАЖАЕМОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

А.С. Подгорний, П.А. Николаев, В.Н. Козловский

DEVELOPMENT OF TOOLS TO ASSESS ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN ELECTRICAL SYSTEMS OF MOTOR VEHICLES

A.S. Podgorny, P.A. Nikolaev, V.N. Kozlovsky

В статье представлены результаты разработки и реализации инструментов оценки электромагнитной поражаемости легковых автомобилей.

Ключевые слова: автомобиль, бортовой электротехнический комплекс, качество, надежность

The article presents the results of development and implementation of assessment tools relating susceptibility of motor vehicles to electromagnetic interference.

Keywords: car, on-board electrical complex, quality, reliability

Комплексное взаимодействие электромагнитного поля (ЭМП) и автотранспортного средства (АТС), является сложной пространственно-временной функцией. Влияние воздействия на функционирование бортовых систем многофакторное и конкретные эффекты электромагнитной совместимости (ЭМС) могут проявляться в зависимости от различных комбинаций. Очевидно, что чем больше вариаций режимов работы автотранспортного средства (АТС) и ЭМП, тем больше количество вариантов поражаемости. Оценка множества ЭМС эффектов исходит из конечного числа взаимодействующих комбинаций. Первоэтапная задача заключается в критериальном обосновании лимитирования условий, определяющих конкретные связи. В контексте АТС необходимо рассматривать только те функции или режимы, которые каким-либо образом влияют на некий физический отклик системы, способный отобразиться в явном виде. Касательно ЭМП, величинами, относительно которых можно рассматривать все множество воз-

действий, являются мощностные или амплитудные параметры [1-4]. В частности за данный параметр адекватно принять напряженность электрического ЭМП, т. к. она определена в автомобильных международных стандартах как калиброванная мера воздействия.

Исходя из сказанного, введем ряд допущений.

1. Все виды электромагнитных полей рассматриваются в контексте воздействий одинаковой напряженности.

2. Энергетические и амплитудные параметры ЭМП задаются для пространства без присутствия АТС.

3. Пренебрегается изменение параметров электромагнитной обстановки (ЭМО) при внесении в данную область АТС.

4. Пространственная ориентация АТС относительно источника не учитывается. Электромагнитное воздействие изотропно во всех направлениях.

5. Рассматривается взаимодействие только одного АТС и конкретного вида электромагнитного воздействия.

6. В процессе взаимодействия ЭМП и АТС могут реализовываться все режимы работы и функционал бортовых систем.

Введем обозначения: $a_i - i^{\text{й}}$ режим работы или функционал бортовой системы, а $b_j - j^{\text{й}}$ вид электромагнитного воздействия. При конкретном виде воздействия можно ожидать N ЭМС эффектов, где N – все режимы работы и функционала бортовых систем, образующие множество $A_{\text{АТС}} = \{a_1 \dots a_N\}$. Количество возможных M электромагнитных воздействий, которым может быть подвержен АТС в процессе своей эксплуатации образуют множество $B_{\text{ЭМП}} = \{b_1 \dots b_M\}$. В соответствии правилом умножения комбинаторики получим матрицу поражаемости АТС [3-5]:

$$F_{\Pi} = \begin{pmatrix} a_1 b_1, & a_1 b_2, & \dots & a_1 b_j, & \dots & a_1 b_M \\ a_2 b_1, & a_2 b_2, & \dots & a_2 b_j, & \dots & a_2 b_M \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_i b_1, & a_i b_2, & \dots & a_i b_j, & \dots & a_i b_M \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_N b_1, & a_N b_2, & \dots & a_N b_j, & \dots & a_N b_M \end{pmatrix}.$$

Соответственно количество вариантов поражаемости АТС равно:

$$K = N \times M.$$

В соответствии с [1] существует пять функциональных классов помехоустойчивости, рассмотренных в первой главе и которые можно записать в виде множества $Z = \{A, B, C, D, E\}$. Очевидно, что любому состоянию $a_i b_j$ матрицы поражаемости

будет соответствовать какой-либо класс

$$F_{\Pi} = \begin{pmatrix} A_{11}, & A_{12}, & \dots & A_{1j}, & \dots & A_{1M} \\ A_{21}, & A_{22}, & \dots & A_{2j}, & \dots & A_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{i1}, & A_{i2}, & \dots & A_{ij}, & \dots & A_{iM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N1}, & A_{N2}, & \dots & A_{Nj}, & \dots & A_{NM} \end{pmatrix} \Big|_{\lim E_{6030} \rightarrow E_{\lim \min}}$$

помехоустойчивости [6-8]. Исходя из этого, сформулируем ЭМС правило: при заданном уровне напряженности электромагнитного воздействия для любого члена $a_i b_j$ матрицы поражаемости существует класс помехоустойчивости множества Z .

Приведем множество Z в обобщенный вид. Введем элемент множества z_q , где $q = 1, 2, 3, 4, 5$. Тогда $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5\}$ Соответственно $z_1 \sim A, z_2 \sim B, z_3 \sim C, z_4 \sim D$ и $z_5 \sim E$. Исходя из этого матрицу поражаемости для некоторого уровня воздействия E_{6030} можно представить в обобщенном виде через множество состояний помехоустойчивости:

$$F_{\Pi} = \begin{pmatrix} z_{q_{11}}, & z_{q_{12}}, & \dots & z_{q_{1j}}, & \dots & z_{q_{1M}} \\ z_{q_{21}}, & z_{q_{22}}, & \dots & z_{q_{2j}}, & \dots & z_{q_{2M}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{q_{i1}}, & z_{q_{i2}}, & \dots & z_{q_{ij}}, & \dots & z_{q_{iM}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{q_{N1}}, & z_{q_{N2}}, & \dots & z_{q_{Nj}}, & \dots & z_{q_{NM}} \end{pmatrix} \Big|_{E=E_{6030}}.$$

Рассмотрим предельные случаи. При E_{6030} , стремящемся к минимальному предельному значению $E_{\lim \min}$, ЭМП не будет оказывать влияние на функционирование электрооборудования АТС [9, 10]. Применяя метод математической индукции на различные виды электромагнитных полей, матрица поражаемости вырождается в полностью функциональный класс «А» и запишется в виде:

Для АТС гражданского применения функциональный класс «А» при $E_{lim.min}$ должен обеспечиваться заложенными решениями в конструкцию с вероятностью $P_{lim} \geq 0,8$, а для АТС специального назначения с $P_{lim} \geq 0,95$. Базируясь на требованиях Правил R10-06 и применяя метод математической индукции, определим для всех видов высокочастотного ЭМП необходимое и требуемое значение $E_{возд.min} = 30$ В/м.

В зависимости от назначения определяется важность работоспособности конкретного режима или функционал бортовой системы. В соответствии с [2] производится ранжирование по трем группам помехоустойчивости:

Группа I: режим или функционал связанные с влиянием на безопасность, как самого АТС, так и других участников дорожного движения. Как пример сюда относятся непреднамеренное срабатывание подушки безопасности, потеря рулевого управления, торможении, остановка двигателя или скачки напряжения, стеклоочистка, а также иммобилизация [11-14].

Группа II: режим или функционал, улучшающие, но не являющиеся существенной для работы и/или управления транспортным средством.

Группа III: режим или функционал, обеспечивающие удобство и комфорт.

На практике взаимодействие ЭМО и АТС происходит более сложно. Если произошло нарушение функционирования одной системы, то в большинстве случаев будут не корректно работать некоторое количество соответствующих функций. И как было показано в п. 3.1, даже при неработающем АТС может происходить его электромагнитная поражаемость. Нередко в конкретной области существуют поля от нескольких источников, излучающих с разных направлений. Если в некоторой сложной ЭМО наблюдается несколько ЭМС эффектов, то имеет место говорить о нарушении работоспособности АТС, как сложной электротехнической системе в интегральном контексте.

Из выражений (1)-(3) следует очевидный вывод: при прочих равных условиях АТС с развитой архитектурой электрооборудования, более подвержено влиянию ЭМП, чем такая же модель, но с меньшим составом бортовых электронных систем. Чем больше внедряется функций, тем больше вероятность нарушения функционирования АТС. Соответственно для минимизации ЭМС рисков следует более основательно подходить к проблеме помехоустойчивости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ISO 16750-1. Road vehicles. Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment. Part 1: General. Third edition. Geneva, 2018. 13 p.

2. Николаев П.А., Кечиев Л.Н. Электромагнитная совместимость автотранспортных средств. Москва: Грифон, 2015. 424 с.

3. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов. Москва: Вузовская книга, 2007. 468 с.

4. Космическое оружие: дилемма безопасности / А.Г. Арбатов, А.А. Васильев, Е.П. Велихов, В.С. Верещетин, М.И. Герасев. Москва: Мир, 1986. 182 с.

5. Подгорный А.С., Николаев П.А., Козловский В.Н. Система контроля поме-

хоустойчивости бортового электротехнического комплекса автомобилей к электромагнитным воздействиям: монография. Тула: ТулГУ, 2022. 180 с.

6. Строганов В.И., Козловский В.Н. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография. Москва, 2014.

7. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Ч. 2 / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 2. С. 19-28.

8. Козловский В.Н. Моделирование электрооборудования автомобилей в про-

цессах проектирования и производства: монография. Тольятти, 2009.

9. **Козловский В.Н.** Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Моск. гос. автодорож. ин-т (техн. ун-т). Тольятти, 2010.

10. Перспективные системы диагностики управления автономным транспортным объектом / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, О.И. Деев и др. // Грузовик. 2017. № 6. С. 21-28.

11. Развитие проектов электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, М.М. Васильев, В.В. Дебелов // Грузовик. 2018. № 6. С. 18-21.

12. **Николаев П.А., Козловский В.Н., Подгорный А.С.** Оценка соответствия ав-

томобилей требованиям помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям // Грузовик. 2017. № 10. С. 44-48.

13. Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный, А.С. Саксонов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 1. С. 36-41.

14. **Николаев П.А., Козловский В.Н., Подгорный А.С.** Испытания автотранспортных средств на устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям / Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 5. С. 43-46.

Подгорный Александр Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник НИС кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета

Николаев Павел Александрович – доктор технических наук, начальник лаборатории электромагнитной совместимости АО «АВТОВАЗ»

Козловский Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, ведущий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета

Alexander S. Podgorny – PhD (Technical Sciences), Research Fellow, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Samara State Technical University

Pavel A. Nikolaev – Dr.Sci. Tech., Head of Electromagnetic Compatibility Laboratory, AVTOVAZ JSC

Vladimir N. Kozlovsky – Dr.Sci. Tech., Professor, Head: Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 10.03.23, принята к опубликованию 27.03.23

УДК 004.413

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ЕГО ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.С. Саксонов, В.Н. Козловский

PROBABILISTIC AND STATISTICAL METHODS FOR ESTIMATING VARIABILITY EFFECTS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE PRODUCTION OF AUTOMOTIVE ALTERNATORS ON STABILITY OF ITS BASIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

A.S. Saxonov, V.N. Kozlovsky

В статье представлены результаты реализации вероятностного расчетно-статистического инструментария оценки влияния вариабельности технологического процесса производства автомобильных генераторов на стабильность его основных электротехнических характеристик.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, автосборочное производство, электрокомпоненты, генератор

The article presents the results of implementing probabilistic and statistical methods for estimating the impact of variability of technological processes applied in automotive alternators production on stability of its basic electrical characteristics.

Keywords: competitiveness, quality, car assembly production, electrical components, generator

Автомобильный генератор – продукт, выпускающийся массово; воздействие группы факторов, влияющих на возникновение технологических погрешностей во время процесса производства, индивидуально для каждого отдельно взятого АГ [1]. Повышение стабильности технологического процесса путем перехода от 8 к 7 качеству (сужение поля допуска на посадку подшипников автомобильного генератора (АГ) до 50 % относительно существующего значения) позволит повысить стабильность основных электротехнических и электро-механических характеристик АГ, а значит и повысить вероятность безотказной работы подшипниковых узлов.

Для реализации вероятностного расчетно-статистического эксперимента по методу Монте-Карло в программу интегрирована подпрограмма генератора случайных чисел, реализующая нормальный закон распределения [2, 3].

Подпрограмма генератора случайных чисел создает две выборки АГ с различными значениями смещения геометрической оси ротора, значения первой выборки лежат в диапазоне установленного в ТУ поля допуска на посадку подшипников в щиты, значения второй – в диапазоне суженного на 50 % поля допуска на посадку подшипников в щиты (табл. 1). Число АГ в каждой выборке – 100 штук.

Теперь следует выполнить оценку результатов, полученных в ходе вероятностного расчетно-статистического эксперимента по методу Монте-Карло (рис. 1-6).

В результате анализа рис. 1 и 2 установлено, что первая выборка АГ имеет меньшую суммарную плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора сравнительно со второй выборкой АГ. Суммарная плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора первой выборки АГ равна 0,7513, второй –

0,80. Большая суммарная плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора АГ свидетельствует о том, что при суженном на 50 % поле допуска на посадку подшипников в щиты технологический процесс становится более стабильным [4, 5].

При повышении стабильности технологического процесса должна повышаться стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик.

Таблица 1 – Диапазон смещений оси ротора АГ при установленном в ТУ и суженном на 50 % полях допусков на посадку подшипников в щиты

Количество АГ в выборке, %	Смещение оси ротора при установленном поле допуска, мкм	Количество АГ в выборке, %	Смещение оси ротора при суженном поле допуска, мкм
4	2,7	2	1,5
5	3,5	7	2,2
6	4,5	12	2,4
12	4,7	16	3,2
18	5,2	26	3,7
27	5,6	17	4,1
16	6,1	10	4,5
8	7,4	4	5,3
3	8,2	4	5,4
1	12	2	5,9

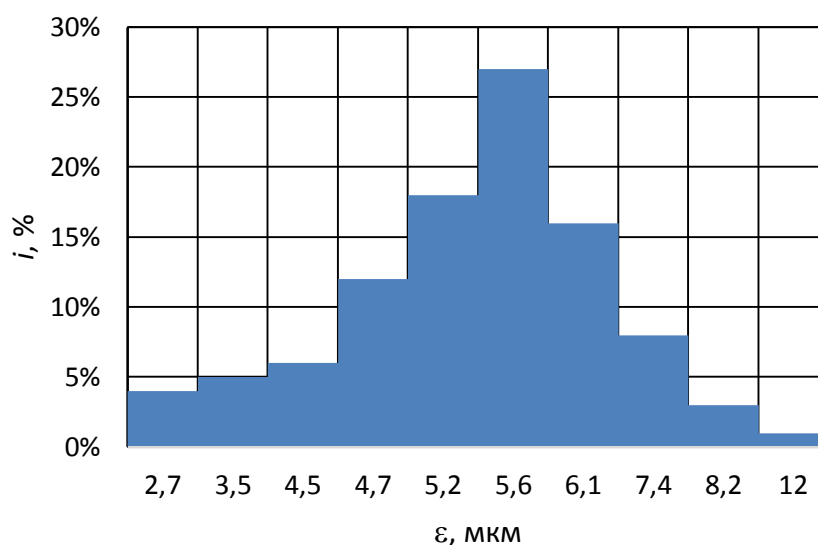


Рис. 1. Гистограмма диапозона значений смещений геометрической оси вращения ротора относительно статора первой выборки АГ

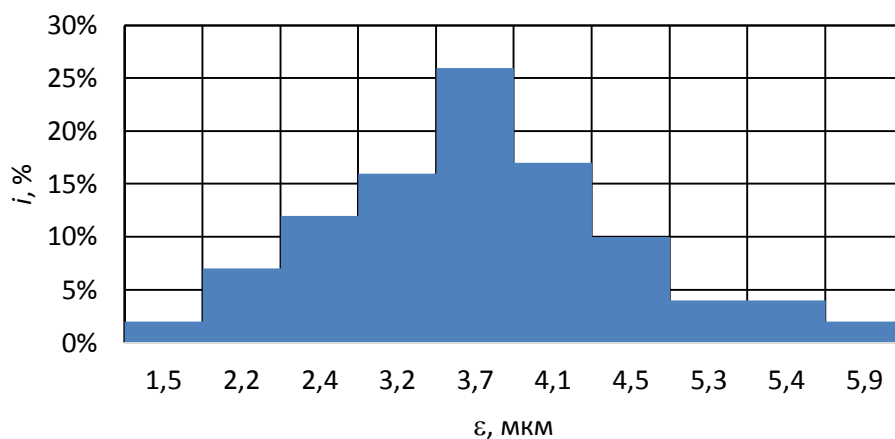


Рис. 2. Гистограмма диапазона значений смещений геометрической оси вращения ротора относительно статора второй выборки АГ

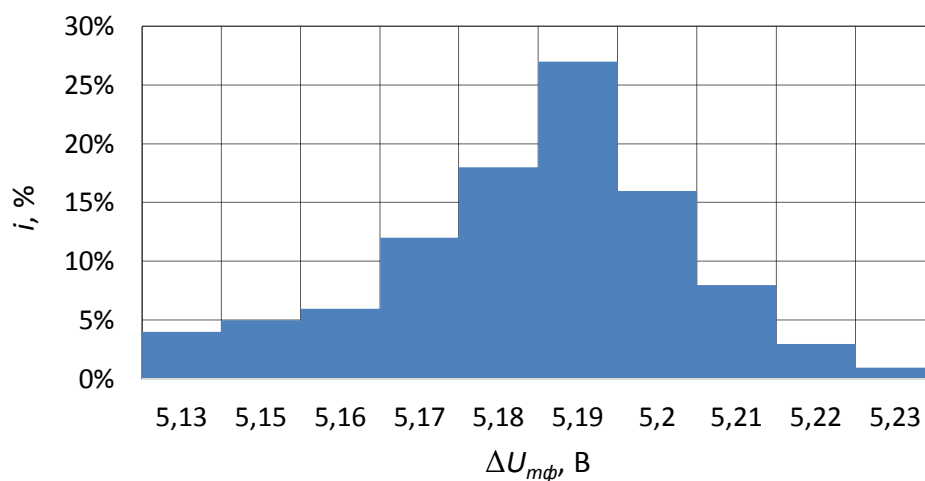


Рис. 3. Гистограмма диапазона амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением воздушного зазора (ВЗ) первой выборки АГ

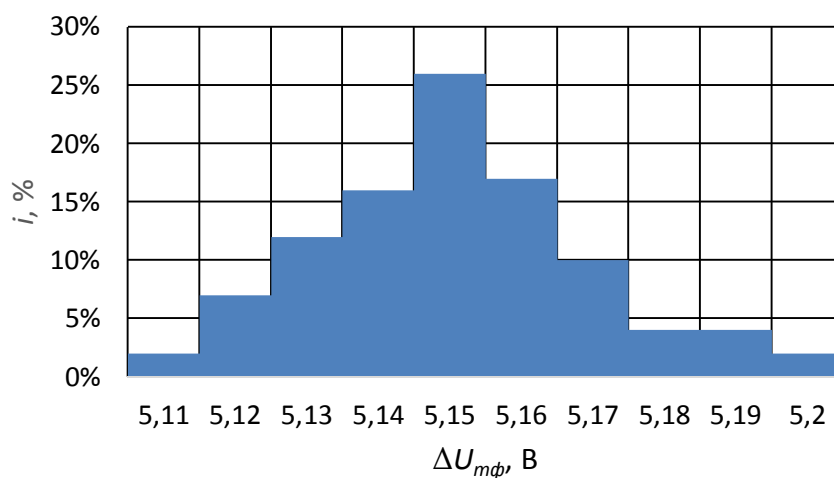


Рис. 4. Гистограмма диапазона амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ второй выборки АГ

В результате анализа рис. 3 и 4 установлено, что первая выборка АГ имеет меньшую суммарную плотность распределения амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса в сравнении со второй выборкой АГ. Суммарная плотность распределения первой выборки АГ равна 0,038, а второй – 0,039. Большая суммарная плотность рас-

пределения амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса АГ свидетельствует о том, что при суженном на 50 % поле допуска на посадку подшипников в щиты основные электротехнические характеристики АГ имеют более высокую стабильность в сравнении с установленным в ТУ полем допуска [6, 7].

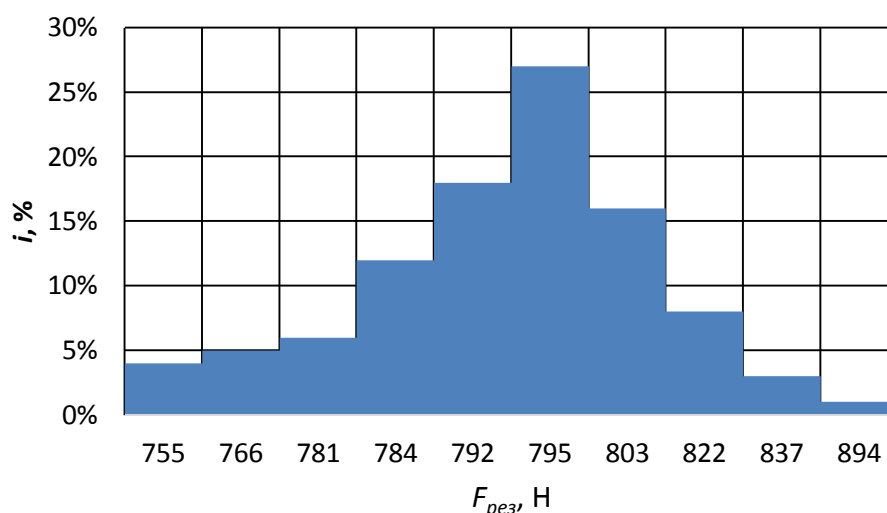


Рис. 5. Гистограмма диапозона значений результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы первой выборки АГ

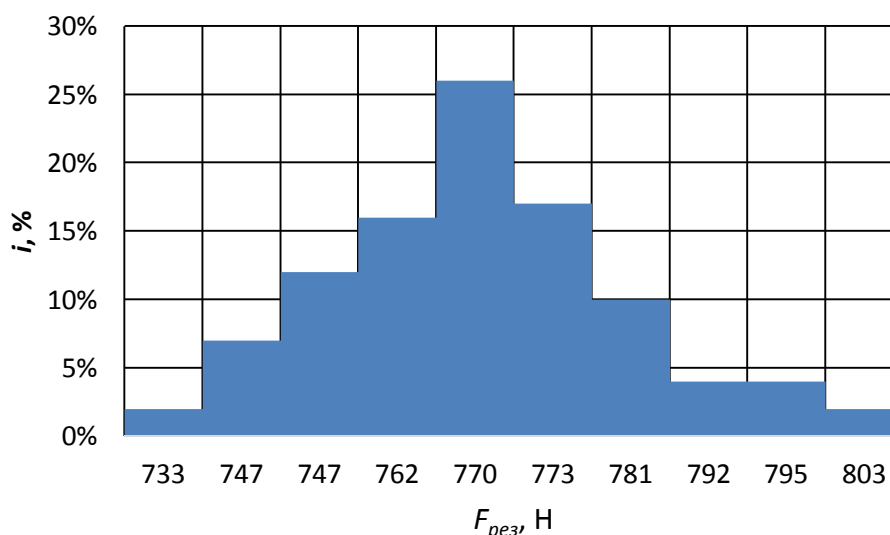


Рис. 6. Гистограмма диапозона значений результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы второй выборки АГ

В результате анализа рис. 5 и 6 установлено, что первая выборка АГ имеет меньшую суммарную плотность распределения значений результирующей силы

в сравнении со второй выборкой АГ. Суммарная плотность распределения значений результирующей силы первой выборки АГ равна 0,047, а второй – 0,054. Большая

суммарная плотность распределения значений результирующей силы АГ выступает свидетельством того, что при суженном на 50 % поле допуска на посадку подшипников в щиты основные электромеханические характеристики АГ имеют более высокую стабильность в сравнении с установленным в ТУ полем допуска [8, 9].

Численные значения плотностей распределения величин смещения геометрической оси ротора, а также основных электротехнических и электромеханических характеристик при установленном в ТУ и суженном на 50 % полях допуска на посадку подшипников в щиты сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Плотности распределения смещения оси ротора, и основных электротехнических и электромеханических характеристик при установленном в ТУ и суженном на 50 % полях допуска на посадку подшипников в щиты

Существующее поле допуска			Суженное поле допуска		
$f(\varepsilon)$, мм	$f(\Delta U_{mf})$, В	$f(\vec{f}_{pez})$, Н	$f(\varepsilon)$, мм	$f(\Delta U_{mf})$, В	$f(\vec{f}_{pez})$, Н
0,0006	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	0,0027	0,0001	$4,95 \cdot 10^{-5}$
0,0096	0,0007	0,0004	0,0312	0,0009	0,0022
0,088	0,0026	0,0064	0,0525	0,0037	0,0022
0,1163	0,0064	0,0064	0,1897	0,0091	0,014
0,1772	0,01	0,0088	0,2224	0,0122	0,0152
0,1911	0,01	0,0139	0,1767	0,0091	0,0133
0,1515	0,0064	0,0111	0,1022	0,0037	0,006
0,0152	0,0026	0,0007	0,0132	0,0009	0,0007
0,0011	0,0001	$9,87 \cdot 10^{-6}$	0,0093	0,0001	0,0003
$1,22 \cdot 10^{-14}$	$2,42 \cdot 10^{-13}$	$3,72 \cdot 10^{-20}$	0,0012	$7,51 \cdot 10^{-6}$	$2,44 \cdot 10^{-5}$

Теперь нужно определить степень влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ, используя коэффициент влияния, который в рамках диссертационного исследования выступает в качестве количественного критерия степени влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ [10, 11]. С применением этого программы получены зависимости коэффициента влияния от разностей амплитудных значений фазного статорного напряжения в точках с минимальным и номинальным значениями ВЗ и коэффициента влияния от значений результирующей

силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ (рис. 7-8).

По результатам анализа графика зависимости коэффициента влияния от амплитудных значений фазного статорного напряжения в точке с минимальным значением ВЗ, сделано заключение, о том, что повышение стабильности технологического процесса (сужение поля допуска на посадку подшипников в щиты на 50 %) благоприятно влияет на стабильность основных электротехнических характеристик АГ [12]. Так, при недостаточной стабильности технологического процесса, значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 1,044-1,063, а при повышенной стабильности технологического процесса значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 1,009-1,044.

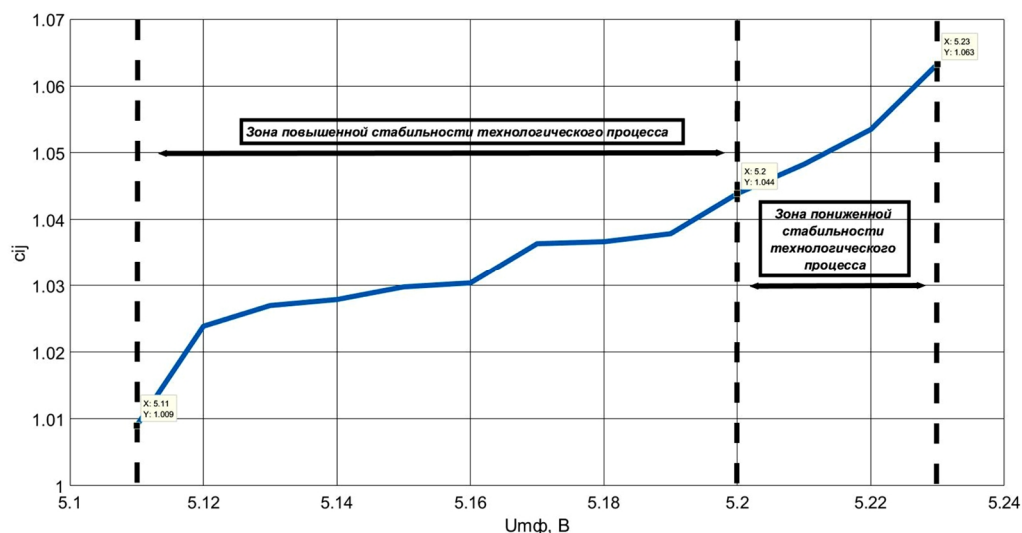


Рис. 7. График зависимости коэффициента влияния от диапазона амплитудных значений фазного статорного напряжения в точке с минимальным значением ВЗ

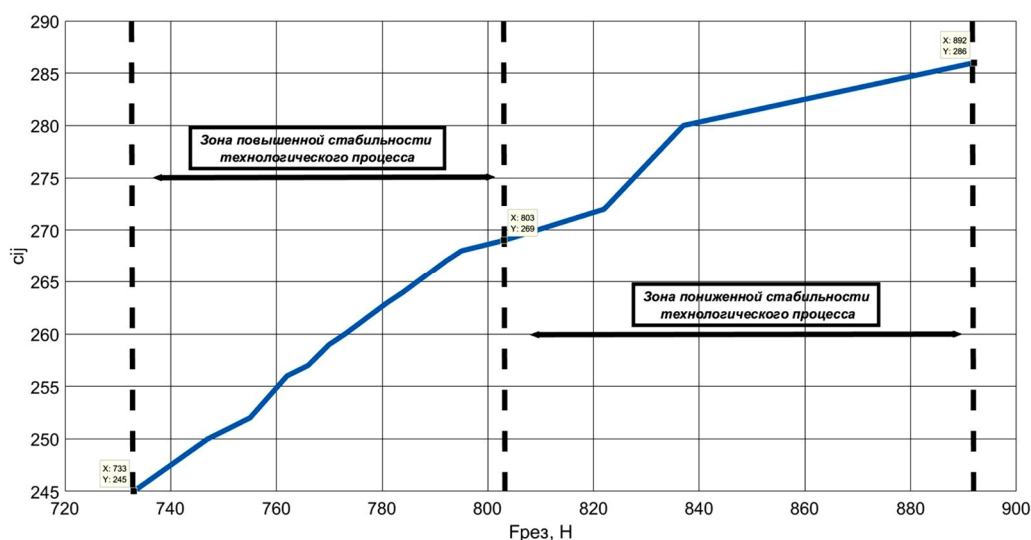


Рис. 8. График зависимости коэффициента влияния от диапазона значений результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы

По результатам анализа графика зависимости коэффициента влияния от значений результирующей силы сделано заключение о том, что повышение стабильности технологического процесса благоприятно влияет на стабильность основных электро-механических характеристик АГ. Так, при

недостаточной стабильности технологического процесса значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 269-286, а при повышенной стабильности технологического процесса значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 245-269.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саксонов А.С., Козловский В.Н., Крицкий А.В. Расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло как

основа инструмента управления качеством транспортных электро-механических преобразователей // Известия Тульского государ-

ственного университета. Технические науки. 2022. № 6. С. 286-292.

2. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения: межгосударственный стандарт: дата введения 26-01-1979 / Государственный комитет СССР по стандартам. Москва: Стандартинформ, 2009. 21 с.

3. ГОСТ 25346-89. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений: межгосударственный стандарт: введен 11-04-1989 / Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. Москва: Стандартинформ, 2001. 26 с.

4. **Строганов В.И., Козловский В.Н.** Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография. Москва, 2014.

5. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Ч. 2 / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 2. С. 19-28.

6. **Козловский В.Н.** Моделирование электрооборудования автомобилей в процессах проектирования и производства: монография. Тольятти, 2009.

7. **Козловский В.Н.** Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей: автореферат дис. ...

д-ра техн. наук / Моск. гос. автодорож. ин-т (техн. ун-т). Тольятти, 2010.

8. **Козловский В.Н., Гурьянов Д.И., Немцев А.Д.** Имитационная модель зарядного баланса автомобильного электрооборудования // Автотракторное электрооборудование. 2002. № 5-6. С. 12.

9. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В.Н. Козловский, У.В. Брачунова, А.В. Крицкий, А.С. Саксонов // Грузовик. 2021. № 7. С. 17-26.

10. **Дебелов В.В., Козловский В.Н.** Вопросы моделирования и реализации системы управления зарядным балансом в автомобилях с комбинированной энергоустановкой. Самара, 2020.

11. Управление зарядным балансом аккумулятора в низковольтной бортовой сети в условиях низких температур и при глубоком разряде аккумуляторной батареи / В.В. Дебелов, А.Н. Малышев, О.А. Чехранова, О.А. Джоджуа, В.Н. Козловский // Форум инновационных транспортных технологий, Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы. Объединённый международный онлайн форум. 2020. С. 1364-1383.

12. **Козловский В.Н., Новикова А.П., Самерханов Р.М.** Имитационное математическое моделирование при решении задач по оценке зарядного баланса автомобильной техники // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 2. С. 30-34.

Козловский Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета

Саксонов Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета

Vladimir N. Kozlovsky – Dr.Sci. Tech., Professor, Head: Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Samara State Technical University

Aleksander S. Saxonov – Postgraduate student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 10.03.23, принята к опубликованию 27.03.23

УДК 621.314

УМЕНЬШЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ИЗМЕНЯЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

И.Ю. Рожнов, Ш.А. Гайнуллин, И.И. Артюхов

MITIGATION OF THE NEGATIVE IMPACT OF THE FREQUENCY CONVERTER ON THE VARIABLE SPEED SYNCHRONOUS GENERATOR

I.Yu. Rozhnov, Sh.A. Gainullin, I.I. Artyukhov

Рассмотрена проблема качества электроэнергии на статоре генератора при подключении к нему преобразователя частоты. Предложен вариант уменьшения негативного влияния преобразователя частоты на генератор при изменении скорости вращения ротора, за счёт установки активного выпрямителя и регулирования его работы с помощью векторного управления. Представлены результаты анализа гармонических составляющих высокой частоты в напряжении статора генератора.

Ключевые слова: газотурбинная установка, скорость вращения ротора, синхронный генератор на постоянных магнитах, активный выпрямитель, система автоматического регулирования

Одним из направлений развития современной электроэнергетики является создание локальных сетей на основе автономных источников энергии. На предприятиях магистрального транспорта газа перспективным представляется использование генераторов собственных нужд (ГСН), которыми оснащаются некоторые типы газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [1, 2]. Пуск газотурбинного ГПА осуществляется при внешнем электроснабжении, затем в работу подключается ГСН после того, как вал отбора мощности ГПА достигает номинальных оборотов.

Недостатком схемы электроснабжения ГПА с ГСН является необходимость ста-

The problem of power quality on the generator stator due to the use of the frequency converter is considered. The invention proposes a version of mitigation negative impact of the frequency converter on the generator at changes in the rotor rotation speed, due to installation of an active rectifier and regulation of its operation using vector control. The results of analysis of THD in the generator stator voltage are presented.

Keywords: gas turbine compressor, rotor rpm, permanent magnets synchronous generator, active rectifier, automatic control system

билизации частоты вращения вала турбины, что усложняет возможность регулирования технологического режима транспорта газа. В соответствии с ГОСТ Р 54404-2011 «Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия» конструкция ГПА должна обеспечивать регулирование его производительности. При этом изменение скорости вращения турбины может находиться в пределах от 70 до 105 % от номинальной в зависимости от требуемого технологического режима работы нагнетателя. Однако необходимость стабилизации скорости вращения вала ГСН не позволяет реализовать это требование.

Электрическая энергия, вырабатываемая ГСН, должна соответствовать требованиям ГОСТ 32144-2013. При работе с фиксированной частотой вращения вала штатная система стабилизации выходного напряжения ГСН обеспечивает выполнение своих функций за счет изменения тока возбуждения. Однако при изменении режима работы ГПА происходит изменение не только частоты выходного напряжения, но и его действующего значения.

Решение проблемы состоит в реализации идеи создания систем электроснабжения, структура которых может перестраиваться в соответствии с режимом работы электроприемников с использованием преобразователей частоты (ПЧ) [3]. ПЧ способны решить задачу стабилизации напряжения и частоты до требуемых параметров, не затрагивая основной технологический процесс работы ГПА.

В типовых конструкциях ГПА используются ГСН с электромагнитным возбуждением. В данной работе рассматривается использование синхронного генератора на

постоянных магнитах (СГПМ) с изменяемой скоростью вращения ротора [4]. Данный вид генератора обладает лучшими энергетическими показателями, имеет надёжную конструкцию за счёт отсутствия обмотки возбуждения.

В работе [5] приведены результаты исследования переходных процессов в автономной системе электроснабжения на базе синхронного генератора с приводом от вала отбора мощности газовой турбины. Было показано, что система СГПМ – ПЧ позволяет получить требуемое качество электрической энергии при изменении скорости вращения вала и параметров нагрузки.

При моделировании полагалось, что СГПМ формирует напряжение на частоте 200 Гц, а ПЧ построен по схеме с промежуточным звеном постоянного тока, при этом входным звеном ПЧ является трехфазный диодный выпрямитель, который потребляет от источника питания несинусоидальный ток [6]. Вследствие этого происходит негативное влияние ПЧ на работу СГПМ, которое иллюстрируют графики на рис. 1 и 2.

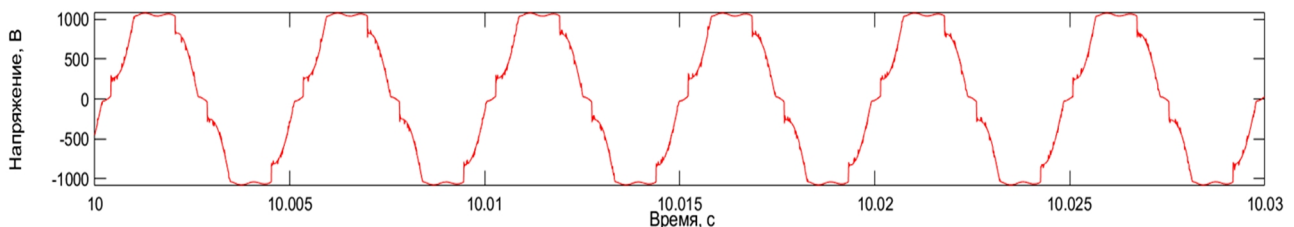


Рис. 1. Виртуальная осциллограмма фазного напряжения на выходе СГПМ

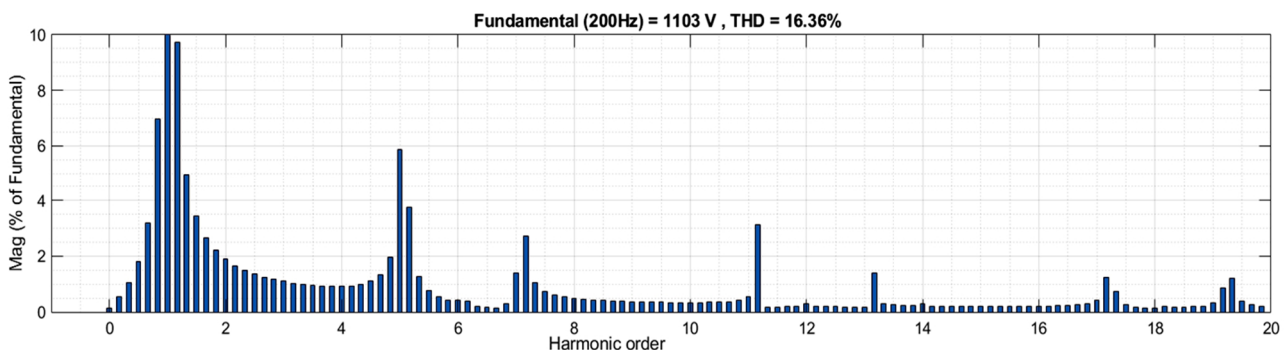


Рис. 2. Гармонический состав напряжения на выходе СГПМ

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на выходе СГПМ составляет более 16 %, что превы-

шает допустимое значение в 2 раза. Таким образом, возникает задача уменьшения искажающего влияния ПЧ на СГПМ. Она

может быть решена различными способами, например, за счет установки различного вида фильтров.

Современный подход к решению задачи электромагнитной совместимости ПЧ с источниками ограниченной мощности предполагает использование активных выпрямителей. Данный вид выпрямителей не только позволяет регулировать и контролировать ток, потребляемый от СГПМ совпадающий по форме и фазе с напряжением, но и обеспечивать требуемый уровень выпрямленного напряжения.

Режим работы СГПМ диктуется признаком механического крутящего момента, который задаётся посредством входного параметра ω – угловая скорость установки (machine speed), размерность рад/с. Изменение скорости вращения вала генератора находится в пределах от 70 до 105 % от номинальной. Данная скорость зависит от основного технологического процесса КС.

Каждая электрическая и механическая части машины представлены моделью пространства состояний второго порядка.

Синусоидальная модель предполагает, что поток, создаваемый постоянными магнитами в статоре, является синусоидальным, что означает, что электродвижущие силы синусоидальны.

В блоке СГПМ используется электрическая система трехфазной синусоидальной модели. Эти уравнения выражаются в системе отсчета ротора (d, q -системе). Все величины в системе отсчета ротора относятся к статору в соответствии с рис. 3.

Электромагнитные процессы жёстко связаны с ротором синхронного генератора и описываются следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}i_q = \\ = \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega_m i_d - \frac{\lambda p\omega_m}{L_q}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$T_e = 1,5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \quad (3)$$

где L_q и L_d – индуктивности по оси q и d ; R – сопротивление обмоток статора; i_q и i_d – токи по оси q и d ; u_q и u_d – напряжения по оси q и d ; ω_m – угловая скорость вращения ротора; λ – амплитуда потока, индуцируемого постоянными магнитами ротора в фазах статора; p – количество пар полюсов; T_e – электромагнитный момент.

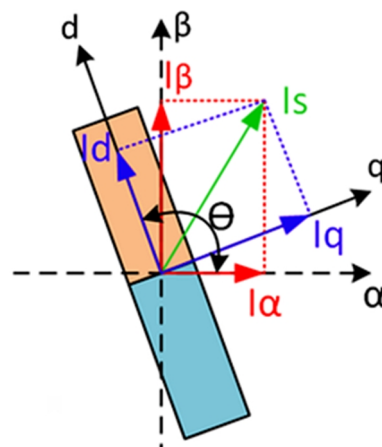


Рис. 3. Координатные преобразования из неподвижных осей α и β , привязанных к статору генератора, вращающимся d и q , привязанных к ротору

Индуктивности L_q и L_d представляют собой соотношение между индуктивностью фазы и положением ротора. Например, индуктивность, измеренная между фазами A и B , определяется:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos\left(2\theta_e + \frac{\pi}{3}\right), \quad (4)$$

где θ – электрический угол между осями фаз продольной оси статора и продольной оси ротора.

Активный выпрямитель используется в качестве регулятора напряжения и управляется с помощью алгоритма векторного управления. Была разработана и исследована имитационная модель блока векторного управления, который представляет собой контур регулирования токов генератора рис. 4.

На начальном этапе измеряются фазные токи в двух обмотках статора СГПМ (i_A, i_B). Ток i_C рассчитывается из условия:

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (5)$$

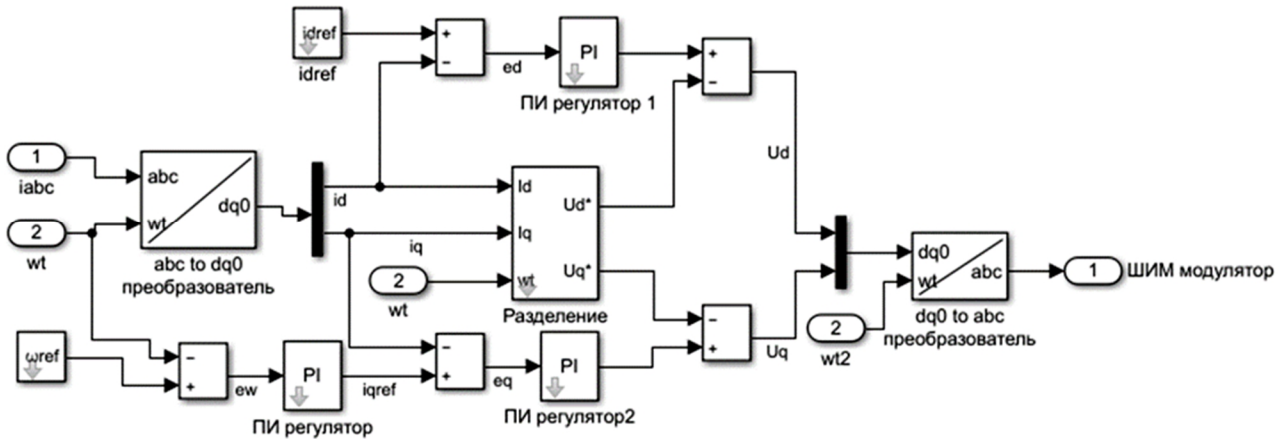


Рис. 4. Имитационная модель блока векторного управления активного выпрямителя

Полученные фазные токи преобразуются в i_α и i_β посредством преобразования Кларка рис. 5 (переход от трёхфазной системы координат к неподвижным осям α и β) [4]

$$i_\alpha = i_A; \quad (6)$$

$$i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}. \quad (7)$$

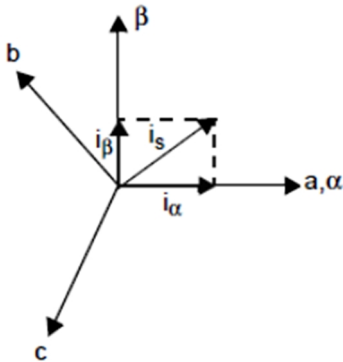


Рис. 5. Векторная диаграмма преобразования Кларка

Исходная скорость вращения ротора генератора снимается с параметрического выхода и сравнивается с расчётной величиной в соответствии с выходной мощностью, что позволяет рассчитывать угол поворота ротора в зависимости от времени работы и скорости вращения. В начальный момент времени угол поворота ротора равен 0.

Вычисленные значения i_α и i_β , а так же измеренный угол θ позволяют получить токи I_d и I_q во вращающейся системе координат, которая связана с ротором генерато-

ра (преобразование Парка рис. 6). Уравнения преобразования Парка:

$$I_d = i_\alpha \sin(\theta) - i_\beta \cos(\theta); \quad (8)$$

$$I_q = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta). \quad (9)$$

Сигналы ошибок формируются с использованием вычисленных и желаемых значений I_d и I_q . В частности I_d – характеризует магнитный поток ротора, I_q – выходной момент генератора.

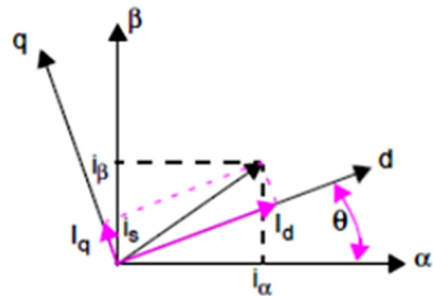


Рис. 6. Векторная диаграмма преобразования Парка

Разность e_d между вычисленным и желаемым значениями токов (сигналы ошибки) подаётся на вход пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора:

$$i_{qref} = K_p e_\omega + K_I \int e_\omega dt. \quad (10)$$

В рассматриваемой системе для контроллера тока используются следующие ПИ регуляторы с условиями развязки:

$$U_d^* = K_{pi} e_d + K_{ii} \int e_d dt + \omega_r L i_{dm}; \quad (11)$$

$$U_q^* = K_{pi} e_q + K_{ii} \int e_q dt - \omega_r (L i_{dm} - K_e), \quad (12)$$

где K_{pi} и K_{ii} – пропорциональный и интегральный коэффициенты усиления регулятора тока соответственно; e_d и e_q – коэффициенты рассогласования опорного тока и тока по оси d и по оси q ; $(\omega_r L i_{dm})$ и $-\omega_r (L i_{dm} - K_e)$ условия рассогласования по оси d и q .

На выходе получаются напряжения (U_d^*, U_q^*) , описывающие напряжение на статоре.

Далее происходит задание нового угла поворота ротора генератора, после чего сигналы поступают в блок обратного преобразования Парка рис. 7

$$U_\alpha = U_d^* \cos(\theta) - U_q^* \sin(\theta); \quad (13)$$

$$U_\beta = U_d^* \sin(\theta) + U_q^* \cos(\theta). \quad (14)$$

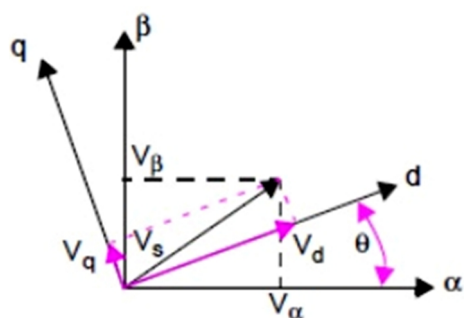


Рис. 7. Векторная диаграмма обратного преобразования Парка

Выходной сигнал $dq (U_\alpha, U_\beta)$ преобразуется в управляющий сигнал $abc (u_a^*, u_b^*, u_c^*)$

посредством обратного преобразования Кларка рис. 8.

$$u_A = U_\alpha; \quad (15)$$

$$u_B = -\frac{1}{\sqrt{2}} U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta; \quad (16)$$

$$u_C = -\frac{1}{\sqrt{2}} U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta. \quad (17)$$

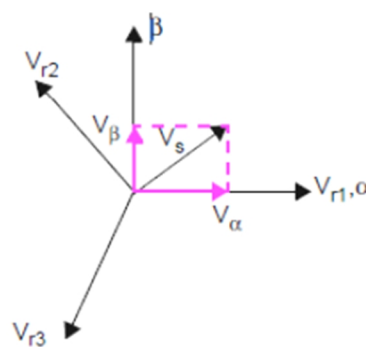


Рис. 8. Векторная диаграмма обратного преобразования Кларка

После преобразований (15), (16), (17) управляющий сигнал abc подаётся на блок ШИМ генератор для создания управляющих импульсов коммутации активного выпрямителя. Для формирования импульсов системы управления активным выпрямителем используется двухуровневый генератор модуляции ширины импульса (сигнала ШИМ). Блок генератора ШИМ (2-уровневый) генерирует импульсы для преобразователей широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на основе несущей частоты.

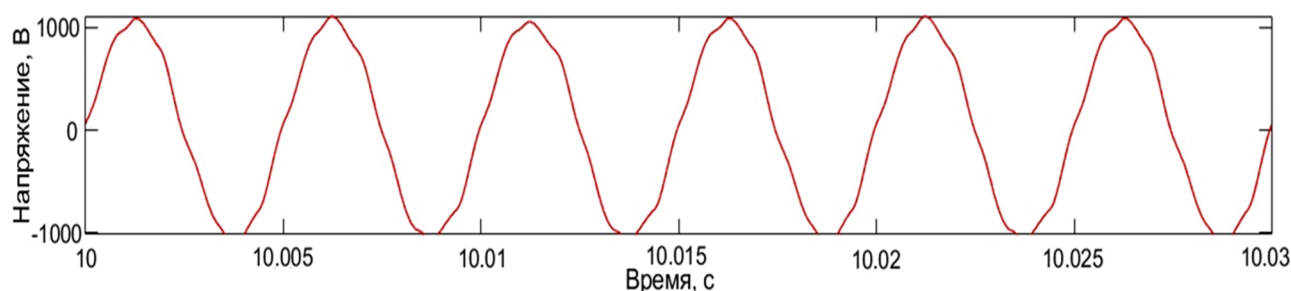


Рис. 9. Виртуальная осциллограмма фазного напряжения на выходе СГПМ при использовании активного выпрямителя

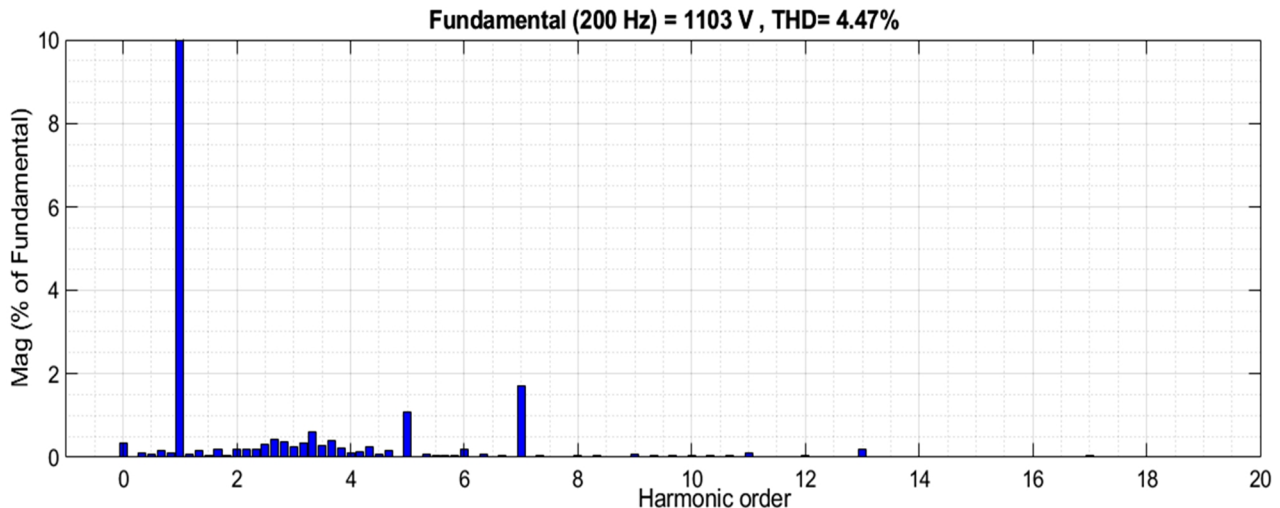


Рис. 10. Гармонический состав напряжения на выходе СГПМ при использовании активного выпрямителя

Посредством разработанной системы управления работы активного выпрямителя удалось снизить негативное влияние ПЧ на работу синхронного генератора с изменяемой скоростью вращения ротора. Результат установки активного выпрямителя и работы системы регулирования

представлен на рис. 9 и 10. Из графиков видно, что в кривой фазного напряжения на выходе СГПМ существенно снизилось процентное содержание гармоник высшего порядка. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения не превышает 5 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Совершенствование системы электропитания газоперекачивающих агрегатов с генераторами собственных нужд / И.И. Артюхов, Д.А. Бочкарев, С.Ф. Степанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 3. № 1 (80). С. 176-181.
2. **Земцов А.И.** Повышение эффективности электропитания газокomppressorного цеха за счёт формирования микросети на основе генераторов собственных нужд газоперекачивающих агрегатов // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. № 3. С. 175-180.
3. Перестраиваемая по структуре автономная система электропитания технологического комплекса с многодвигательным электроприводом / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, А.В. Коротков и др. // Вестник Саратовского государственного техни-

- ческого университета. 2006. Т. 1. № 1 (10). С. 20-28.
4. **Гаврилов Р.С., Мустафаев Ю.Н.** Управление синхронными машинами с постоянными магнитами. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т, 2019. 78 с.
5. **Рожнов И.Ю.** Исследование переходных процессов в автономной системе электропитания на базе синхронного генератора на постоянных магнитах // Вопросы электротехнологии. 2022. № 2 (35). С. 53-59.
6. **Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Тримбач А.А.** Качество электроэнергии в системе электропитания газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 2(60). С. 165-170.

Рожнов Игорь Юрьевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Гайнуллин Шамиль Альбертович – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor Yu. Rozhnov – Postgraduate, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Shamil A. Gainullin – Postgraduate, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ivan I. Artyukhov – Dr.Sci. Tech., Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 14.03.23, принята к опубликованию 27.03.23

УДК 621.3.078

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ «МЕРТВОГО» ВРЕМЕНИ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.В. Стариков, О.С. Беляева, Д.А. Пудовкина

INFLUENCE OF THE «DEAD» TIME ON HARMONIC COMPOSITION OF THE OUTPUT VOLTAGE OF THE FREQUENCY CONVERTER

A.V. Starikov, O.S. Belyaeva, D.A. Pudovkina

Частотные преобразователи с синусоидальной модуляцией пришли на смену инверторам с π -коммутацией транзисторов для улучшения гармонического состава выходного напряжения. Однако, традиционная синусоидальная модуляция требует введения так называемого «мертвого» времени каждый период широтно-импульсной модуляции при переключении транзисторов полумостов. Приведены диаграммы управляющих сигналов, подаваемых на силовые транзисторы частотного преобразователя, при традиционной синусоидальной ШИМ с учетом «мертвого» времени и аналитическое выражение для расчета амплитуд первой и высших гармоник выходного фазного напряжения при работе на активную симметричную трехфазную нагрузку. Произведена вариация величины «мертвого» времени и найдены амплитуды гармоник с первой по тридцать девятую. Построены графики зависимостей относительных значений ряда высших гармоник в функции «мертвого» времени. Найдены также величины суммарного коэффициента гармонических составляющих при различных значениях «мертвого» времени. Сделан вывод, что введение «мертвого» времени приводит к резкому увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих.

Ключевые слова: частотный преобразователь, фазное напряжение, широтно-импульсная модуляция, высшие гармоники

Frequency converters with sinusoidal modulation have replaced inverters with π -switched transistors to improve harmonic composition of the output voltage. However, traditional sinusoidal modulation requires introduction of the so-called "dead" time every period of pulse-width modulation when switching half-bridge transistors. The diagrams of the control signals applied to the power transistors of the frequency converter, with traditional sinusoidal PWM, taking into account the "dead" time, and analytical expression for calculating the amplitudes of the first and higher harmonics of the output phase voltage when operating on an active symmetrical three-phase load are given. A variation of the value of the "dead" time was performed and the amplitudes of the harmonics from the first to the thirty-ninth were found. The graphs of dependences of the relative values of a number of higher harmonics as a function of "dead" time are constructed. The values of the total coefficient of harmonic components are also found for various values of the "dead" time. It is concluded that introduction of "dead" time leads to a sharp increase in the total coefficient of harmonic components.

Keywords: frequency converter, phase voltage, pulse-width modulation, higher harmonics

Введение

С целью улучшения гармонического состава выходного напряжения частотные преобразователи с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) заменили инверторы с π -коммутацией транзисторов [1, 2]. Действительно, старый способ, который в определенных случаях применяется и до сих пор, имеет амплитуду 5-й гармоники, составляющую 20 % от амплитуды первой, а 7-й гармоники – 14% [2-4].

Как правило, при синусоидальной ШИМ формирование необходимого напряжения на статорных обмотках асинхронного двигателя, подключенного к частотному преобразователю, осуществляется посредством подключения каждой из трех фаз то к плюсу, то к минусу источника постоянного напряжения на каждом периоде ШИМ [87]. Например, синусоидальное напряжения на фазе *A* формируется посредством переключения транзисторов частотного преобразователя одного полумоста VT1 и VT4 (рис. 1) с переменной скважностью [5, 6].

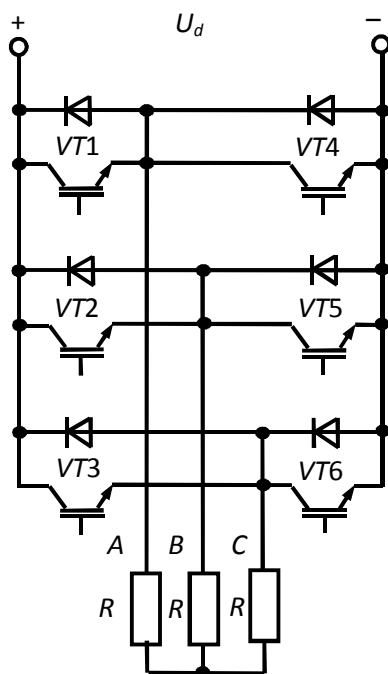


Рис. 1. Упрощенная силовая схема частотного преобразователя

То есть переключение транзисторов полумоста осуществляется по так называемому симметричному закону, причем нулю

напряжения будет соответствовать скважность $\gamma_1 = \gamma_4 = 0,5$ [5]. Если пренебречь задержкой времени, вводимой при переключении транзисторов каждого полумоста (так называемым «мертвым» временем), силовые транзисторы частотного преобразователя с традиционной синусоидальной модуляцией работают в соответствии со следующим законом [5, 6]

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{N_U}{2^{n_p}} \sin(2\pi f_1 t) \right]; \\ \gamma_2 &= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{N_U}{2^{n_p}} \sin\left(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \right]; \\ \gamma_3 &= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{N_U}{2^{n_p}} \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) \right]; \\ \gamma_4 &= 1 - \gamma_1; \gamma_5 = 1 - \gamma_2; \gamma_6 = 1 - \gamma_3, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ и γ_6 – скважности открытого состояния соответственно транзисторов VT1, VT2, VT3, VT4, VT5 и VT6; N_U – цифровой код, определяющий величину действующего значения напряжения; f_1 – заданная частота напряжения на выходе инвертора; t – время.

Действительно, если силовые транзисторы частотного преобразователя заставить работать по закону (1), то следует ожидать снижения амплитуд высших гармоник во много раз [6]. При этом силовые транзисторы VT1 и VT4 работают каждый период широтно-импульсной модуляции в противофазе, также как и пары ключей VT2 и VT5, VT3 и VT6.

Однако, при переключениях транзисторов каждого полумоста необходимо вводить «мертвое» время. При этом силовые транзисторы должны работать в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 2. Величинами $\tau_{VT1}, \tau_{VT2}, \tau_{VT3}, \tau_{VT4}, \tau_{VT5}$ и τ_{VT6} обозначены временные интервалы открытого состояния соответствующих транзисторов, а τ_{dt} – «мертвое» время.

Целью проводимого исследования является определение влияния величины «мертвого» времени на гармонический состав выходного фазного напряжения частотного преобразователя с синусоидальной ШИМ.

Решение задачи

Допустим, что к выходу инвертора подключена симметричная активная нагрузка, соединенная в звезду. Это допущение принято для адекватного сравнения результатов, полученных при анализе работы частотных преобразователей с π -коммутацией транзисторов [2, 3]. Тогда, проследив работу транзисторов за период синусоиды,

можно сделать вывод, что фазное напряжение на выходе частотного преобразователя представляет собой кусочно-постоянную функцию, принимающую значения 0 , $\frac{1}{3}U_d$, $\frac{1}{2}U_d$ и $\frac{2}{3}U_d$, где U_d – величина напряжения в линии постоянного тока.

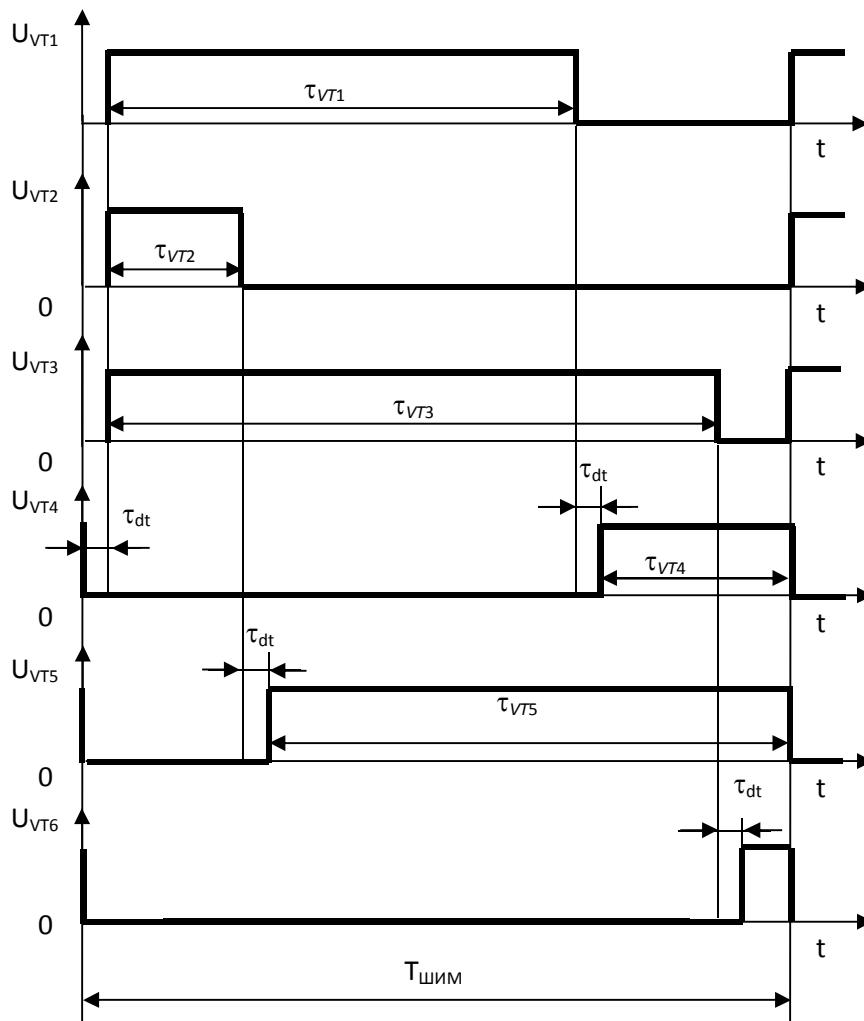


Рис. 2. Диаграмма управляющих сигналов, подаваемых на силовые транзисторы частотного преобразователя, при традиционной синусоидальной ШИМ с учетом «мертвого» времени

Амплитуды высших гармоник при традиционной синусоидальной модуляции с учетом введения «мертвого»

времени можно определить по следующему аналитическому выражению [5]

$$b_n = -\frac{2U_d}{3n\pi} (B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned}
B_1 &= \left\{ \sum_{h=0}^{\frac{v}{6}-2} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1-2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] - \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1+2\pi/3)+1}{2} \right) \right] + \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} \right\} \\
B_2 &= \sum_{h=\frac{v}{6}-1}^{\frac{v}{6}} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1-2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} \\
B_3 &= \cos \left[n\theta_1 \left(d_1 + \frac{\sin(d_1\theta_1+2\pi/3)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(d_1 + \frac{\sin(d_1\theta_1-2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] + \\
&\quad + \frac{3}{2} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(d_1 + \frac{\sin(d_1\theta_1)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(d_1 + \frac{\sin(d_1\theta_1+2\pi/3)+1}{2} \right) \right] \right\} \\
B_4 &= \sum_{h=\frac{v}{6}+2}^{\frac{v}{2}-2} \left\{ 3 \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1+2\pi/3)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1-2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} + \right. \\
&\quad + \frac{3}{2} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1+2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1+2\pi/3)+1}{2} \right) \right] \right\} \\
&\quad \left. + 2 \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1+2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} \right\} \\
B_5 &= \frac{3}{2} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(d_2 + \frac{\sin(d_2\theta_1+2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(d_2 + \frac{\sin(d_2\theta_1+2\pi/3)+1}{2} \right) \right] \right\} + \\
&\quad + 2 \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(d_2 + \frac{\sin(d_2\theta_1)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(d_2 + \frac{\sin(d_2\theta_1+2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} + \\
&\quad + 2 \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(d_3 + \frac{\sin(d_3\theta_1)+1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(d_3 + \frac{\sin(d_3\theta_1+2\pi/3)+1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_6 = & \frac{3}{2} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(d_4 + \frac{\sin(d_4\theta_1 - 2\pi/3) + 1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(d_4 + \frac{\sin(d_4\theta_1 - 2\pi/3) + 1}{2} \right) \right] \right\} + \\
 & + 2 \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(d_4 + \frac{\sin(d_4\theta_1) + 1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(d_4 + \frac{\sin(d_4\theta_1 - 2\pi/3) + 1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} \\
 B_7 = & \sum_{h=\frac{v}{2}+2}^{\frac{5v}{6}-2} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1 - 2\pi/3) + 1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1 + 2\pi/3) + 1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\} + \\
 & + \frac{3}{2} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1 - 2\pi/3) + 1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1 - 2\pi/3) + 1}{2} \right) \right] \right\} \\
 & + 2 \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1) + 1}{2} \right) \right] - \cos \left[n\theta_1 \left(h + \frac{\sin(h\theta_1 - 2\pi/3) + 1}{2} + \frac{\theta_{dt}}{\theta_1} \right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

где n – номер гармоники $\theta_1 = \frac{2\pi f_1}{f_{ШИМ}}$; $f_{ШИМ}$ – частота широтно-импульсной модуляции; $v = \frac{f_{ШИМ}}{2f_1}$; $\theta_{dt} = 2\pi f_1 \tau_{dt}$ – угол, определяемый величиной «мертвого» времени τ_{dt} .

Следует отметить, что формула (2) справедлива только для максимального значения фазного напряжения, формируе-

мого частотным преобразователем. Тем не менее, варьируя величину τ_{dt} , найдем значения амплитуд гармоник с 1-й по 39-ю при $U_d = 515$ В, $f_1 = 50$ Гц, $f_{ШИМ} = 4,8$ кГц, $v = 48$ и работе инвертора на активную симметричную нагрузку (табл. 1).

В таблице приведены также значения амплитуд первой и высших гармоник при $\tau_{dt} = 0$, которые рассчитываются по более простой формуле, приведенной в [6].

Таблица 1 – Значения амплитуд высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя с синусоидальной ШИМ в зависимости от величины «мертвого» времени τ_{dt}

$\tau_{dt} = 0$ мкс	$b_1 = 257,211$ В	$b_3 = 0,21$ В	$b_5 = 0,084$ В	$b_7 = 0,054$ В
	$b_9 = 0,04$ В	$b_{11} = 0,032$ В	$b_{13} = 0,027$ В	$b_{15} = 0,023$ В
	$b_{17} = 0,02$ В	$b_{19} = 0,017$ В	$b_{21} = 0,015$ В	$b_{23} = 0,014$ В
	$b_{25} = 0,012$ В	$b_{27} = 0,011$ В	$b_{29} = 0,01$ В	$b_{31} = 0,009$ В
	$b_{33} = 0,008$ В	$b_{35} = 0,007$ В	$b_{37} = 0,006$ В	$b_{39} = 0,005$ В
$\tau_{dt} = 5$ мкс	$b_1 = 249,632$ В	$b_3 = 0,136$ В	$b_5 = -1,131$ В	$b_7 = 0,087$ В
	$b_9 = -2,724$ В	$b_{11} = -3,073$ В	$b_{13} = -4,158$ В	$b_{15} = -3,081$ В
	$b_{17} = -3,483$ В	$b_{19} = -3,9$ В	$b_{21} = -4,564$ В	$b_{23} = -4,898$ В
	$b_{25} = -5,207$ В	$b_{27} = -5,085$ В	$b_{29} = -5,029$ В	$b_{31} = -5,328$ В
	$b_{33} = -5,142$ В	$b_{35} = -5,376$ В	$b_{37} = -4,839$ В	$b_{39} = -5,27$ В

Окончание табл. 1

$\tau_{dt} = 10 \text{ мкс}$	$b_1 = 243,972 \text{ В}$	$b_3 = -0,395 \text{ В}$	$b_5 = 1,111 \text{ В}$	$b_7 = 0,456 \text{ В}$
	$b_9 = -2,389 \text{ В}$	$b_{11} = -3,486 \text{ В}$	$b_{13} = -4,314 \text{ В}$	$b_{15} = -3,424 \text{ В}$
	$b_{17} = -3,617 \text{ В}$	$b_{19} = -3,558 \text{ В}$	$b_{21} = -4,625 \text{ В}$	$b_{23} = -4,828 \text{ В}$
	$b_{25} = -5,321 \text{ В}$	$b_{27} = -5,043 \text{ В}$	$b_{29} = -5,308 \text{ В}$	$b_{31} = -5,191 \text{ В}$
	$b_{33} = -5,398 \text{ В}$	$b_{35} = -5,153 \text{ В}$	$b_{37} = -5,139 \text{ В}$	$b_{39} = -4,944 \text{ В}$
$\tau_{dt} = 15 \text{ мкс}$	$b_1 = 236,313 \text{ В}$	$b_3 = -0,927 \text{ В}$	$b_5 = -2,349 \text{ В}$	$b_7 = 0,994 \text{ В}$
	$b_9 = -2,057 \text{ В}$	$b_{11} = -3,897 \text{ В}$	$b_{13} = -4,469 \text{ В}$	$b_{15} = -3,765 \text{ В}$
	$b_{17} = -3,749 \text{ В}$	$b_{19} = -3,725 \text{ В}$	$b_{21} = -4,689 \text{ В}$	$b_{23} = -4,767 \text{ В}$
	$b_{25} = -5,438 \text{ В}$	$b_{27} = -5 \text{ В}$	$b_{29} = -5,567 \text{ В}$	$b_{31} = -5,043 \text{ В}$
	$b_{33} = -5,639 \text{ В}$	$b_{35} = -4,945 \text{ В}$	$b_{37} = -5,431 \text{ В}$	$b_{39} = -4,627 \text{ В}$
$\tau_{dt} = 20 \text{ мкс}$	$b_1 = 229,654 \text{ В}$	$b_3 = -1,46 \text{ В}$	$b_5 = 3,584 \text{ В}$	$b_7 = 1,528 \text{ В}$
	$b_9 = -1,729 \text{ В}$	$b_{11} = -4,308 \text{ В}$	$b_{13} = -4,622 \text{ В}$	$b_{15} = -4,103 \text{ В}$
	$b_{17} = -3,881 \text{ В}$	$b_{19} = -3,892 \text{ В}$	$b_{21} = -4,757 \text{ В}$	$b_{23} = -4,714 \text{ В}$
	$b_{25} = -5,56 \text{ В}$	$b_{27} = -4,956 \text{ В}$	$b_{29} = -5,804 \text{ В}$	$b_{31} = -4,884 \text{ В}$
	$b_{33} = -5,865 \text{ В}$	$b_{35} = -4,753 \text{ В}$	$b_{37} = -5,714 \text{ В}$	$b_{39} = -4,321 \text{ В}$

По данным табл. 1 построены графики изменения относительных значений 3-й, 5-й, 7-й и 9-й гармоник выходного фазного напряжения частотного преобразователя с синусоидальной ШИМ в функции величины «мертвого» времени τ_{dt} (рис. 3). Они показывают, что амплитуды 3-й, 5-й и 7-й гармоники с увеличением τ_{dt} неуклонно возрастают. Амплитуды гармоник, начиная с 9-й и выше, имеют разнонаправленные тенденции изменения. Кроме того, следует

обратить внимание на то, что амплитуда первой гармоники уменьшается при увеличении τ_{dt} . По данными табл. 1 по выражению [7]

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} b_n^2}}{b_1} \times 100, \%$$

также подсчитан суммарный коэффициент гармонических составляющих (табл. 2).

Таблица 2 – Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих в функции τ_{dt}

$\tau_{dt}, \text{ мкс}$	0	5	10	15	20
$K_U, \%$	0,095	7,23	7,54	7,94	8,41

Табл. 2 наглядно показывает, что введение «мертвого» времени приводит к резкому увеличению значения коэффициента K_U . При этом следует обратить внимание на тот факт, что при определенном значении τ_{dt} частотный преобразователь как источник электропитания перестает удовлетворять требованиям ГОСТ 32144-2013 [7]. В связи с этим предлагаемый подход к определению влияния «мертвого» времени на гармонический состав выходного фазного напряжения ча-

стотного преобразователя с синусоидальной ШИМ позволяет сформулировать требования к граничной величине τ_{dt} .

Действительно, аналитические исследования гармонического состава выходного напряжения частотных преобразователей с различными законами коммутации силовых транзисторов позволяют на этапе проектирования принять необходимое техническое решение, удовлетворяющее всем требованиям, предъявляемым к новой раз-

работке. Это касается как выбора закона коммутации транзисторов, так и собствен-

но «мертвого» времени, если введение такового необходимо.

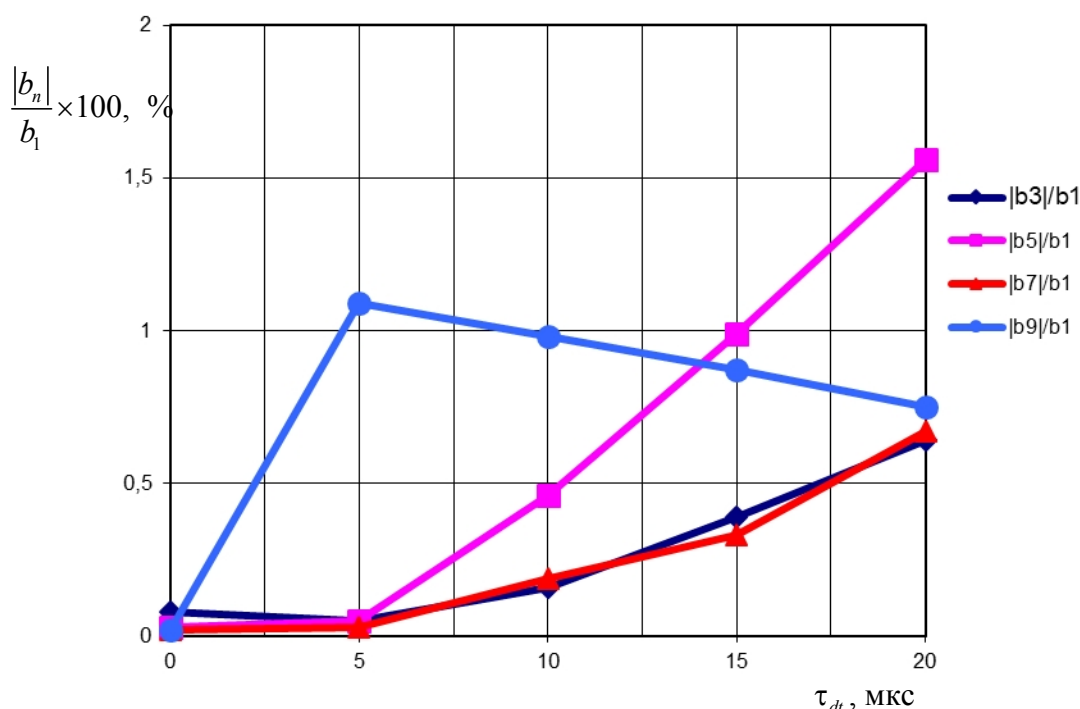


Рис. 3. Графики зависимостей 3-й, 5-й, 7-й и 9-й гармоник выходного фазного напряжения частотного преобразователя с синусоидальной ШИМ в функции величины «мертвого» времени τ_{dt}

Выводы

1. Введение «мертвого» времени приводит к резкому увеличению амплитуд высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя и суммарного коэффициента гармонических составляющих.

2. Увеличение «мертвого» времени

приводит к росту суммарного коэффициента гармонических составляющих и снижению амплитуды первой гармоники.

3. Исследования гармонического состава частотных преобразователей на этапе проектирования позволяет выбрать обоснованное решение при их технической реализации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. Москва: Машиностроение, 1990. 304 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Москва: Академия, 2006. 265 с.
3. Стариков А.В., Лисин С.Л., Рокало Д.Ю. Анализ качества выходного напряжения частотных преобразователей с простейшими законами коммутации си-

ловых транзисторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2018. № 2 (58). С. 128-134.

4. Стариков А.В., Рокало Д.Ю. Влияние процесса коммутации силовых транзисторов в частотном преобразователе на работу электрооборудования погружного насоса // Ашировские чтения: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. С. 366-370.

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

6. **Starikov A.V., Belyaeva O.S., Kir-dyashev V.A.** The analytical research of the «Dead» time influence on the harmonic composition of the frequency converter voltage //

SMART Automatics and energy, proceedings of SMART-ICAE 2021. SIST. 2022. Vol. 272. P. 427-437.

7. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.

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

Беляева Ольга Сергеевна – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Пудовкина Диля Алексеевна – студент магистратуры кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

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

Olga S. Belyaeva – Postgraduate student, Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Dilya A. Pudovkina – Master student, Department of Electric Drive and Industrial Automation, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.03.23, принята к опубликованию 27.03.23

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 07.04.2023 Дата выхода в свет 10.04.2023

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 10,5 Уч. изд. л. 4,4

Тираж 500 экз. Заказ 18 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 2-е полугодие 2023 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: 07.04.2023 Date of publication: 10.04.2023

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 10,5 Publication base sheet 4,4

Circulation: 500 printed copies. Order 18 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