

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (30)
Март 2021

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
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА

Редакционная коллегия

С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
А.А. ЗАХАРОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
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
В.О. ЮДИНА	ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (30)
March 2021

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:

KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA

Assistant to the Editor-in-Chief:

BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH

Chief Executive Officer

YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

S.G. KALGANOVA	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
Yu.S. ARKHANGELSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
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
A.A. ZAKHAROV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
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
V.O. YUDINA	Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Макаров А.Н., Павлова Ю.М., Окунева В.В. Изменение КПД дуг и удельного расхода электроэнергии в процессе плавки в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel 5

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Максимов С.П., Кузнецов П.А. Автономный источник электропитания наведенным напряжением воздушной линии электропередачи 12

Михайлов В.Е. Цифровой тренд отраслевого инжиниринга в целях устойчивого развития энергетики и энергомашиностроения 24

Данилов С.А., Коваленко А.И., Волошин А.А., Волошин Е.А., Сазанов В.С. Система автоматического адаптивного изменения параметров срабатывания релейной защиты в распределительных сетях 33

Кошелев П.А., Блинов Ю.И., Блинов К.Ю. Расчёт коэффициента связи и взаимной индуктивности магнитно-связанных обмоток 44

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Хуснутдинов А.Н., Антипанова И.С., Киснеева Л.Н. Подход к определению интегрального показателя надежности технических систем на этапе разработки 52

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Вавилов В.Е., Минияров А.Х., Веселов А.М., Пермин Д.Ю., Пронин Е.А. Исследование влияния механических нагрузок на электромагнитные показатели магнитопровода из аморфной стали 62

Войко А.В., Фомин А.А. Исследование влияния геометрических параметров и тока индуктора на процесс цементации титана в контейнере с углеродосодержащей средой 71

К сведению авторов 79

CONTENTS

ELECTRICAL ENGINEERING

Makarov A.N., Pavlova Yu.M., Okuneva V.V. Changes in arc efficiency and specific power consumption when melting in arc steelmaking furnaces of conventional design and Consteel	5
--	---

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Maksimov S.P., Kuznetsov P.A. Autonomous power supply by induced voltage of an overhead power line	12
Mikhailov V.Ye. A digital trend in sectoral engineering aimed at sustainable development of the electric power and power-plant industries.....	24
Danilov S.A., Kovalenko A.I., Voloshin A.A., Voloshin E.A., Sazanov V.S. A system of automatic adaptive changing of relay protection operation parameters in distribution networks.....	33
Koshelev P.A., Blinov K.Yu., Blinov Yu.I. Calculation of the coupling and mutual inductance coefficient for magnetically coupled windings.....	44

ELECTROMECHANICS.

ELECTRICAL DEVICES

Litvinenko R.S., Auhadeev A.E., Khusnutdinov A.N., Antipanova I.S., Kisneeva L.N. Approach to defining an integrated reliability index for engineering systems at the design stage.....	52
--	----

ELECTRICAL MATERIALS AND PRODUCTS

Vavilov V.E., Miniyarov A.Kh., Veselov A.M., Permin D.Yu., Pronin E.A. Research into the influence of mechanical loads on electromagnetic indicators of the magnetic circuit made of amorphous steel	62
Voyko A.V., Fomin A.A. Investigation of the influence of geometric parameters and inductor current on titanium carburization in a container with a carbon-containing medium	71
Information for Authors	79

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 669.187:621.186:45.43

ИЗМЕНЕНИЕ КПД ДУГ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ПЛАВКИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ОБЫЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ И CONSTEEL

А.Н. Макаров, Ю.М. Павлова, В.В. Окунева

CHANGES IN ARC EFFICIENCY AND SPECIFIC POWER CONSUMPTION WHEN MELTING IN ARC STEELMAKING FURNACES OF CONVENTIONAL DESIGN AND CONSTEEL

A.N. Makarov, Yu.M. Pavlova, V.V. Okuneva

Изложены результаты расчета КПД дуг сталеплавильных печей на различных стадиях расплавления шихты при изменении высоты слоя шлака. После прорезки колодца в шихте КПД дуг максимален. В процессе расплавления высота шихты и КПД дуги уменьшаются. Возрастание высоты слоя шлака в открытый период приводит к увеличению КПД дуг. Расчетные данные подтверждены экспериментальными исследованиями на дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Осуществлен сравнительный анализ работы печей Consteel и обычной конструкции, а также анализ энергетических показателей печей. Отмечены преимущества и недостатки печей Consteel по сравнению с печами обычной конструкции.

Ключевые слова: электрическая дуга, печь, сталь, излучение, КПД, дуговая сталеплавильная печь, Consteel, теплообмен, удельный расход электроэнергии

Введение

Электрическая дуга – основной источник энергии в дуговой сталеплавильной печи. Энергия, поступающая в ДСП от дуг, составляет 55-65 %, оставшиеся 35-45 %

The results of calculating efficiency of arcs in steel-making furnaces at various stages of charge melting with the changes in the height of a slag layer are presented. On cutting a well in the charge, the arc efficiency is at the maximum. In the course of the melting process, the height of the charge and the arc efficiency decrease. Increasing the height of a slag layer in the open period leads to increasing the arc efficiency. The estimated data are confirmed by experimental studies on electric arc furnaces (EAF). A comparative analysis of the operation of Consteel furnaces and conventional furnaces has been performed, including the analysis of energy indicators of the furnaces. The emphasis has been made on the advantages and disadvantages of Consteel furnaces in comparison with the furnaces of conventional design.

Keywords: electric arc, furnace, steel, radiation, efficiency, steel arc furnace, Consteel, heat exchange, specific power consumption

энергии поступают от газокислородных горелок, экзотермических реакции окисления железа, марганца, кремния, кокса и электродов кислородом. Тепловое излучение является важным средством передачи тепла дуг в ДСП и составляет 92-96 % [1-4].

На долю теплопроводности и конвекции приходится 4-8 % мощности дуг [5].

Для снижения энергопотребления ДСП важно организовать энерготехнологический режим работы печи таким образом, чтобы поток теплового излучения дуг максимально попадал на металлошихту и ванну металла и минимально – на футерованные откосы, водоохлаждаемые панели стен и свода.

1. Анализ работы дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции

КПД дуги определяется отношением полезной мощности дуги $P_{пол}$, идущей на нагрев, расплавление металла и шлака, к мощности дуги P_d

Отношение полезной мощности дуги $P_{пол}$, идущей на нагрев, расплавление металла и шлака, к мощности дуги P_d харак-

теризует коэффициент полезного использования тепла, или КПД дуги [5]:

$$\eta_d = \frac{P_{пол}}{P_d} = 0,08 + 0,9\varphi_{dm}, \quad (1)$$

где φ_{dm} – средний угловой коэффициент излучения дуги на металл, показывающий долю мощности дуги, излучающую столбом дуги на металлошихту и ванну металла.

Используем методику расчета для анализа изменения КПД дуг в процессе расплавления шихты и при увеличении высоты слоя шлака в современных высокомоощных 100-тонных ДСП, описанную в [5]. На основе анализа определено положение шихты, электродов, дуг, ванны металла в рабочем пространстве ДСП (рис. 1) (футеровка пода, откосов, водоохлаждаемые панели стен, свода и кожух не показаны).

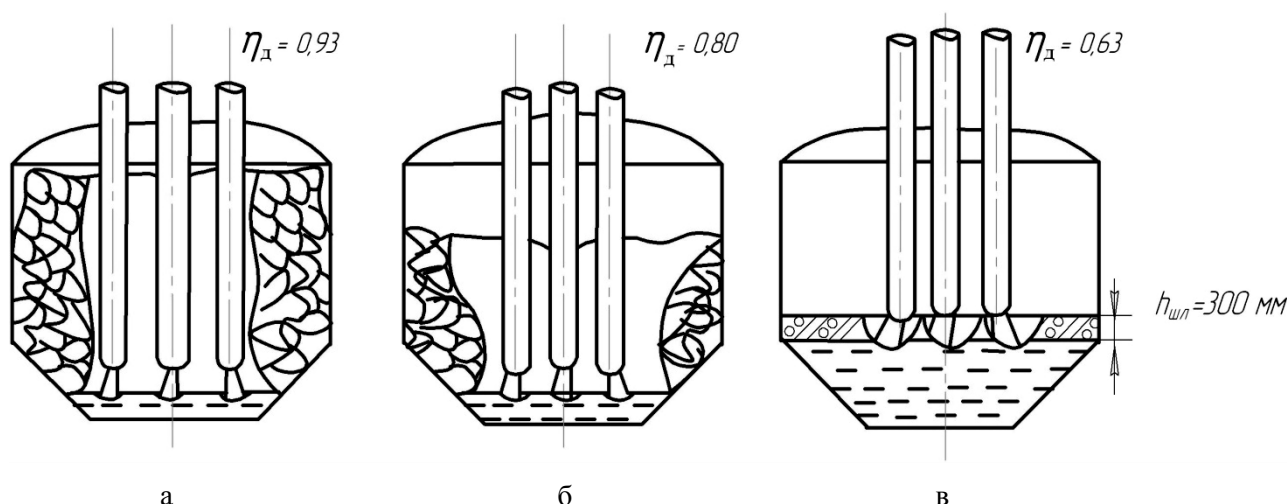


Рис. 1. Изменение положения шихты и КПД дуг в процессе расплавления шихты в рабочем пространстве ДСП на начало (а), середину расплавления (45-50 % шихты расплавилось) (б), конец расплавления (в); $h_{шл}$ – высота шлака, мм

По данным экспериментальных исследований [5], дуги прорезают колодец в ДСП за 5-6 минут. К концу данного промежутка времени 95-96 % теплового излучения дуга попадает на ванну металла и шихту и только 4-5 % выходит из колодца высотой 2,8-3 м, и попадает на поверхность свода (рис. 1 а). Вследствие того, что 92-96 % электрической мощности дуг преобразуется в поток теплового излучения, КПД дуг в начале расплавления шихты $\eta_d = 0,93$.

С течением времени потери дуг возрастают за счет увеличения жидкого металла и уменьшения объема шихты и высоты колодца, что приводит к тому, что 20-25 % потока теплового излучения дуг попадают на водоохлаждаемые панели стен и свода. Потери мощности дуг увеличиваются до 20 %, а КПД дуг снижается до $\eta_d = 0,8$ (рис. 1 б). К концу периода вся шихта расплавилась и КПД дуг снизился до $\eta_d = 0,47$ при отсутствии шлака и до $\eta_d = 0,63$ при высоте слоя шлака $h_{шл} = 300 \text{ мм}$ (рис. 1 в).

Результаты аналитического исследования КПД дуг в процессе расплавления шихты в ДСП-100 приведены на рис. 2 (кривая 1).

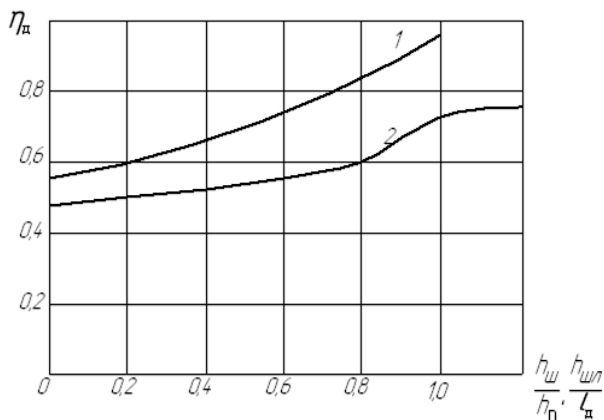


Рис. 2. Зависимость КПД дуги от отношения высоты шихты $h_{ш}$ к высоте рабочего пространства печи h_n (1), от отношения высоты шлака $h_{шл}$ к длине дуги l_d (2)

В результате использования устройств для вспенивания шлака толщина слоя шлака в ДСП-100 составляет 150-500 мм. Результаты расчета КПД дуг для окончания

расплавления шихты в зависимости от высоты шлака даны на рис. 2 (кривая 2). В расчетах длина дуги принята постоянной $l_d = 500$ мм. Как видно из рис. 2 (кривая 2), при отсутствии слоя шлака КПД дуги $\eta_d = 0,47$. При высоте шлака $h_{шл} = 100$ мм $\eta_d = 0,51$. С ростом слоя шлака КПД дуг увеличивается (при $h_{шл} = 500$ мм $\eta_d = 0,74$). При возрастании высоты шлака свыше 500 мм КПД дуг увеличивается незначительно, достигая максимума ($\eta_d = 0,76$) (см. рис. 2, кривая 2) и далее остается практически неизменным, что объясняется электромагнитным выдуванием дуг [6-8]. Расчет и анализ КПД дуг в процессе плавки стали в ДСП позволили объяснить повышенный (по сравнению с печами, работающими на металлическом ломе) удельный расход электроэнергии в ДСП при плавлении металлизированных окатышей.

Рассмотрим энергобалансы плавки стали в современных высокомоощных электропечах ДСП-100, ДСП-130, ДСП-150, ДСП-150₀ вместимостью 100, 130, 150 т соответственно (таблица).

Энергетические балансы плавки стали в ДСП

Показатели плавов, статьи прихода и расхода энергии	ДСП-150 ₀ [5]	ДСП-130 [10]	ДСП-100 [11]	ДСП-150 [12]
Шихта	40 % лома + + 60 % окатышей	Лом		
Единицы измерения энергии	(кВт·ч/т)/ %	(кВт·ч/т)/%	(кВт·ч/т)/%	(кВт·ч/т)/%
Приход энергии				
В том числе электрическая энергия	530/71,4	444/68,3	410/65	400/55,4
энергия экзотермических реакций	158/21,3	160/24,6	160/25	220/30,5
энергия, вносимая горелками	54/7,3	46/7,1	60/10	102/14,1
Итого	742/100	650/100	630/100	722/100
Расход энергии				
В том числе теплосодержание жидкой стали	380/51,2	380/58,5	380/60	388/53,7
теплосодержание жидкого шлака	77,5/10,5	50/7,7	50/8	46/6,4
электрические потери установки	32/4,3	33/5,1	10/2	36/5
потери с отходящими газами	135/18,2	127/19,5	140/22	198/27,4
потери с поверхности печи и с охлаждающей водой	117,5/15,8	60/9,2	50/8	54/7,5
Итого	742/100	650/100	630/100	722/100

На печах применяются все современные способы интенсификации процесса плавки стали: топливно-кислородные горелки (ТКГ), инжекторы угольного порошка, кислородные фурмы для окисления железа и прочих элементов шихты и др. Сравниваемые печи работают в одинаковых энергетических режимах и имеют следующие показатели: удельная мощность электропечного трансформатора – 700-800 кВА/т; расход кислорода – 20-30 м³/т, природного газа – 5-10 м³/т, угля – 5-15 кг/т; продолжительность плавки – 45-60 мин; масса выплавленной стали – 100-150 т.

Энергетические балансы выполнены различными авторскими коллективами [5, 10-12]. Теплосодержание жидкой стали у всех авторских коллективов одинаковое и составляет 380-388 кВт·ч/т. Теплосодержание жидкого шлака равно 46-50 кВт·ч/т. Электрические потери в печах составляют 4-5 % расхода энергии. Меньшие электрические потери в печи ДСП-100 связаны с меньшими длиной и сопротивлением электрической сети печи. Большие потери с охлаждающими газами в печи ДСП-150, составляющие 27,4 %, связаны с более интенсивным использованием ТКГ, большим количеством вводимого в печь топлива и более интенсивным использованием кислородных фурм, кислорода и окислением большей по сравнению с другими печами части железа и прочих элементов шихты. При этом увеличивается приход тепла от экзотермических реакций и сокращается до 400 кВт·ч/т удельный расход электроэнергии. Проведенные исследования показывают [5], что расход охлаждающей воды в печах ДСП-150₀ в 2-2,5 раза больше по сравнению с аналогичными по вместимости и мощности печами ДСП-150. Различие в потерях с охлаждающей водой можно объяснить различием КПД дуг в печах.

Аналитическими исследованиями установлено и экспериментальными исследованиями подтверждено, что КПД дуг в процессе расплавления шихты максимален при горении дуг в колодце и снижается с уменьшением высоты колодца в шихте. Повышению КПД дуг в открытый период

плавки способствуют вспенивание и увеличение высоты слоя шлака. Анализ КПД дуг позволяет выбирать энергосберегающий энерготехнологический режим работы ДСП.

2. Сравнительный анализ работы дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel

Впервые дуговая сталеплавильная печь системы Consteel была введена в эксплуатацию на заводе Charlotte в США в 1989 году, и с тех пор по всему миру было закуплено около 40 таких установок. В начале эксплуатации ни одна другая инновационная технология выплавки не показывала лучших результатов [13].

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. за счет подогрева шихты расход электроэнергии в печах Consteel был меньше на 80-120 кВт·ч/т по сравнению с печами обычной конструкции (рис. 3). Преимущества печей Consteel по сравнению с печами обычной конструкции были очевидны, следовательно, их использование в мировой металлургии неуклонно возрастало [13].

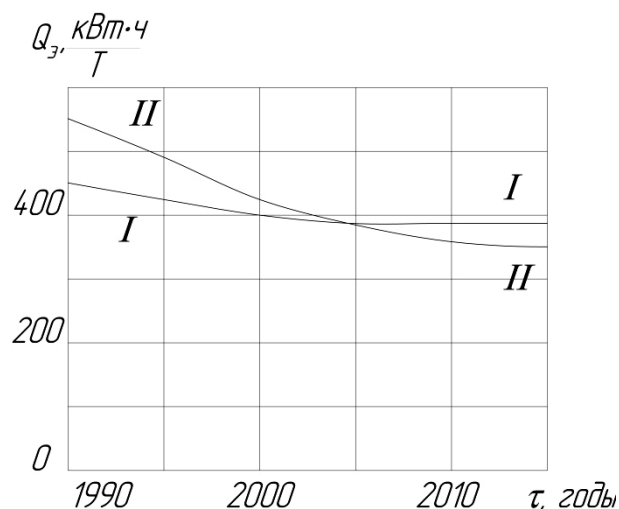


Рис. 3. Изменение удельного расхода электроэнергии в печах Consteel (I) и обычной конструкции (II) за период 2003-2015 гг.

С целью повышения производительности и уменьшения энергопотребления в середине 1990-х гг. печи Consteel и обычной конструкции оснащают различными способами интенсификации процесса плавки: увеличение мощности печи до 700 кВА/т,

применение газокислородных горелок, окисление железа и других элементов шихты кислородом, исключение восстановительного периода из печи, вспенивание шлака путем вдувания угольного порошка, применение фурм для дожигания газов в печи. Интенсификация процессов плавки стали в печах привела к уменьшению разности в показателе удельного расхода электроэнергии в печах Consteel и обычной конструкции. В 1996-2003 гг. удельный расход электроэнергии в печах Consteel при работе на 100 %-м скрапе составил 380-410 кВт·ч/т [14, 15], в печах обычной конструкции – 420-430 кВт·ч/т [5]. В начале 2000-х гг. разность в удельном потреблении электроэнергии печью Consteel по сравнению с ДСП обычной конструкции снижается до 30-40 кВт·ч/т стали.

Последующее увеличение мощности печей Consteel и обычной конструкции в 2003-2015 гг. привело к дальнейшему повышению производительности, снижению времени плавки и удельного расхода электроэнергии. В настоящее время удельный расход электроэнергии при работе на 100 %-м скрапе в печах Consteel составляет 385-395 кВт·ч/т [16], в печах обычной конструкции – 360-375 кВт·ч/т [17] (см. рис. 3). Данное явление объясняется путем проведения расчета и анализа изменения коэффициента полезного действия (КПД) дуг печей обычной конструкции и Consteel.

В настоящее время печи Consteel обладают меньшей мощностью, скорость плавления лома и часовая производительность в этих печах меньше по сравнению с современными ДСП обычной конструкции [16]. Авторы публикаций, посвященных печам Consteel (начало 1990 гг.), заявляли температуру нагрева лома отходящими из печи газами 600-800°C, что не соответствует действительности: в печах Consteel шихта нагревается до температуры около 300° С [16]. Дальнейшие исследования показали, что печи Consteel уступают печам обычной конструкции по энергетическим и экономическим показателям. Расчеты КПД дуг печей Consteel и обычной конструкции доказали, что меньший в настоящее время

на 15-35 кВт·ч/т удельный расход электроэнергии в печах обычной конструкции по сравнению с печами Consteel является закономерностью, а не случайностью.

Расход тепловой энергии в ДСП является одним из основных факторов, определяющих экономическую эффективность плавки стали в этих печах. Тепловую энергию вводят в ДСП с помощью электрических дуг, факелов ГКГ, окислением кислородом углерода, части железа и других металлов, использованием жидкого чугуна в качестве составляющей шихты, подогрева лома теплом отходящих газов. Анализ энергобалансов плавок стали в современных высокомоощных электропечах ДСП-100-ДСП-150 (табл. 1) показал, что электрические дуги являются основным источником энергии в электропечах: на их долю приходится 55-65 % энергии, поступающей в ДСП. От ГКГ, реакций окисления углерода, железа, подогрева шихты и других способов ввода тепла поступает 35-45 % энергии. Поскольку электрическая энергия в электрических дугах преобразуется в основном в поток теплового излучения [18], важно так организовать работу ДСП, чтобы поток теплового излучения дуг максимально попадал на металлошихту и ванну металла, а на водоохлаждаемые панели стен и свода, футерованные откосы – минимально. В этом случае КПД дуг увеличивается, а потребляемая печью электроэнергия уменьшается. Попадание теплового потока излучения дуг на металлошихту или на водоохлаждаемые панели зависит от расположения шихты в рабочем пространстве печи и конструкции ДСП. Рассмотрим распределение теплового потока излучения дуг в ДСП-120 Consteel (ДСП-120со) и в ДСП-120 обычной конструкции (ДСП-120об) оснащенной современными средствами интенсификации плавки.

Печи ДСП-120со, ДСП-120об работают как плавильные агрегаты. Доводочные технологические операции рафинирования, легирования, коррекции химического состава, гомогенизации расплава и другие вынесены в агрегаты печь-ковш. Описываемое исследование является продолжением

научной работы, результаты которой изложены в [18].

Преимущества плавки стали в ДСП-120 конструкции Consteel АМЗ по сравнению с обычными электропечами аналогичной мощности и вместимости следующие: нагрев шихты на конвейере отходящими газами; непрерывная загрузка лома конвейером и уменьшение времени бестоковых пауз, снижение тепловых потерь при исключении открытия свода для завалки шихты; горение дуг на жидкометаллическую ванну и стабильный электрический режим; отсутствие обвалов шихты, коротких замыканий и обрывов дуг.

Однако за период эксплуатации ДСП-120 Consteel на АМЗ выявили ряд следующих недостатков в конструкции печи [19]: не обеспечивается заявленная изготовителем температура 300°C нагрева лома на конвейере (в действительности температура лома на конвейере составляет 150-200°C); в зимнее время не испарившаяся влага вместе с шихтой поступает в ванну, что приводит к хлопкам и взрывам; при простоях печи в зимнее время конвейер во избежание стопорения приходится освобождать от шихты; на футеровке откосов образуется полуспекшаяся шихта, которая срывается в ванну и вызывает вскипание последней с выбросом шлака и пламени; расход элек-

троэнергии на 6-9 % больше по сравнению с ДСП-120 аналогичной мощности и вместимости. Повышенный расход электроэнергии в ДСП конструкции Consteel по сравнению с ДСП обычной конструкции отмечается другими авторами и на других металлургических заводах [16, 20].

Расчет КПД дуг электропечей ДСП-120, методика которого изложена в учебнике для студентов металлургических кафедр университетов и сотрудников научных организаций [5], и примеры расчета в статьях [7, 18] позволяют объяснить причины повышенного расхода электроэнергии в ДСП-120 Consteel по сравнению с ДСП-120 обычной конструкции. Режим работы ДСП-120об с загрузкой шихты одной, двумя корзинами по эффективности теплообмена электрических дуг превосходит режим работы ДСП-120со с загрузкой шихты конвейером. ДСП-120об практически все время плавки работает с большим КПД дуг по сравнению с ДСП-120со. Более половины времени плавки в ДСП-120об дуги горят в колодце в шихте и их КПД изменяется от 0,76 до 0,6 в зависимости от высоты колодца. В ДСП-120со дуги в течение всего времени плавки излучают тепло на воздухоохлаждаемые стены, свод, на ванну металла, и их КПД изменяется от 0,76 до 0,66 в зависимости от высоты слоя шлака.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никольский Л.Е.** Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
2. **Окороков Н.В.** Дуговые сталеплавильные печи / Н.В. Окороков. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
3. **Егоров А.В.** Электроплавильные печи черной металлургии / А.В. Егоров. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
4. **Сойфер В.М.** Выплавка стали в кислых электропечах / В.М. Сойфер. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.
5. **Макаров А.Н.** Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических

- печах и энергетических установках / А.Н. Макаров. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
6. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубление в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах / А.Н. Макаров [и др.] // Промышленная энергетика. 2014. № 10. С. 10-15.
7. **Makarov A.N.** Electromagnetism and the Arc Efficiency of Electric Arc Steel Melting Furnaces / A.N. Makarov, V.V. Rybakova, M.K. Galicheva // J. of Electromagnetic Analysis and Applications. 2014. Vol. 6. P. 184-192.
8. **Makarov A.N.** Theory of radiative heat exchange in furnaces, fire boxes, combustion chamber is replenished by four new laws /

A.N. Makarov // Science Discovery. 2014. № 2. P. 34–42. DOI: 10/11648/j.sd20140202.12.

9. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологи выплавки стали в дуговой печи / М.С. Кузнецов [и др.] // Электromеталлургия. 2010. № 2. С. 2-6.

10. Гудим Ю.А. Существует ли реальная альтернатива лому в электросталеплавильном производстве / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселев // Электromеталлургия. 2008. № 5. С. 27-30.

11. Рациональные способы интенсификация плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю.А. Гудим [и др.] // Электromеталлургия. 2005. № 9. С. 2-6.

12. Борн К. Потенциальные возможности и проблемы утилизации тепла в сталеплавильных цехах / К. Борн, Р. Грандерат // Металлургическое производство и технология. 2013. № 2. С. 8-19.

13. Боровинских С.В. В Россию приходит инновационный электросталеплавильный процесс / С.В. Боровинских // Электromеталлургия. 2007. № 9. С. 13-16.

14. Argenta P. EAF integration into the blast furnace route at Wheeling Pittsburgh /

P. Argenta, M. Corbella // MPI International. 2006. № 2. P. 42-47.

15. Samways N. Revitalized with anew continuous steel making process / N. Samways // Iron and steel technology. 2005. № 6. P. 29-45.

16. Тулуевский Ю.Н. Новые возможности печей Consteel / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров, В.Г. Швер // Электromеталлургия. 2011. № 6. С. 22-27.

17. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов [и др.] // Электromеталлургия. 2012. № 8. С. 2-6.

18. Макаров А.Н. Изменение КПД дуг в процессе плавки в дуговых сталеплавильных печах / А.Н. Макаров // Металлург. 2017. № 4. С. 55-58.

19. Особенности технологии выплавки стали в электропечи ДСП-120 Consteel и пути ее совершенствования / З.Х. Шакиров [и др.] // Электromеталлургия. 2013. № 9. С. 2-7.

20. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов [и др.] // Электromеталлургия. 2012. № 8. С. 2-6.

Макаров Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» Тверского государственного технического университета

Павлова Юлия Михайловна – аспирант, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тверского государственного технического университета

Окунева Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тверского государственного технического университета

Anatoly N. Makarov – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University

Yulia M. Pavlova – Postgraduate, Senior Lecturer, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University

Victoria V. Okuneva – Ph. D., Associate Professor, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University

Статья поступила в редакцию 05.03.2021, принята к опубликованию 14.03.2021

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.62, 621.3.056.5

АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НАВЕДЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

С.П. Максимов, П.А. Кузнецов

AUTONOMOUS POWER SUPPLY BY INDUCED VOLTAGE OF AN OVERHEAD POWER LINE

S.P. Maksimov, P.A. Kuznetsov

В работе представлены результаты сравнительного анализа традиционных автономных источников электропитания и источника электропитания наведенным напряжением воздушной линии электропередачи. Обозначены области применения источников электропитания наведенным напряжением, в частности для электропитания постов контроля системы телеметрии гололедно-ветровых нагрузок на воздушные линии электропередачи (СТГН). Приведены результаты расчета и моделирования наведенного напряжения с учетом влияния заземленных конструкций опор линий по разработанной авторами методике. Методика расчета проверена экспериментально на физической модели однофазной воздушной линии электропередачи. Произведен расчет для трехфазной одноцепной воздушной линии напряжением 110 кВ и определен режим работы преобразующе-стабилизирующего блока источника электропитания.

Ключевые слова: источник электропитания; воздушная линия электропередачи; наведенное напряжение; моделирование электромагнитного поля

Введение

С повышением спроса на интеллектуализацию и цифровизацию в сфере электроэнергетики всё более широкое применение

The paper presents the results of a comparative analysis conducted for autonomous conventional power sources and power supply sources with induced voltages of overhead power transmission lines. The application domain for power sources of induced voltages are outlined, particularly, for power supply of control posts in the telemetry system of ice and wind loads on overhead power lines (STGN). The presented results to estimation and modeling of induced voltages with account for the influence of grounded structures of line supports are based on the methodology developed by the authors. The calculation methodology has been tested experimentally using the physical model of a single-phase overhead power transmission line. The calculation for a three-phase single-circuit 110 kV overhead line was performed, and the operating mode of the power supply transformer stabilizing unit was determined.

Keywords: telemetry system of ice and wind loads on overhead power lines (TSIW), power supply, induced voltage, an electromagnetic field model

получают системы телеметрии гололедно-ветровых нагрузок (СТГН), позволяющие удаленно контролировать нагрузку на провода, тросы, траверсы и стойки ВЛ [1].

Результатом работы СТГН является актуальная информация о гололедно-ветровых нагрузках на участки ВЛ, недоступные для оперативного осмотра дежурным персоналом, на основании которой можно производить своевременную плавку гололедных отложений. Терминальный узел данной системы, содержащий датчики физических воздействий, контроллер управления, устройства связи, источник электропитания, называется постом контроля и устанавливается на участке ВЛ, наиболее подверженном гололедно-ветровой нагрузке.

По сравнению с терминальными узлами большинства других систем мониторинга в электроэнергетике посты контроля СТГН имеют следующие особенности:

- требование наличия автономного источника питания;
- использование устройств беспроводной связи (GSM-канал, радиоканал, спутниковая связь);
- подогрев оборудования при температурах ниже -45°C .

Устройства беспроводной связи и подогрев значительно увеличивают энергопотребление поста контроля по сравнению с подобными устройствами на подстанциях и электростанциях, имеющими проводную связь, размещенными зачастую в помещениях с температурой выше -45°C и питаемыми от централизованной сети.

Это приводит к проблеме выбора источника электропитания поста контроля СТГН или других маломощных удаленных от централизованной сети низкого напряжения устройств.

В статье [2] производится сравнение источников электропитания, традиционно применяемых для электроснабжения указанных выше электроприемников: солнечные панели, трансформаторы напряжения, трансформаторы тока и ветрогенераторы. Источники сравнивались по следующим показателям:

- независимость от режима работы ВЛ;
- независимость от уровня тока ВЛ;
- независимость от солнечной активности;

- независимость от скорости ветра;
- применение с оборудованием, находящимся под потенциалом провода;
- надежность работы;
- затраты на эксплуатацию;
- ориентировочная стоимость.

В работе также произведен расчет системы электропитания от двух устройств: аккумуляторной батареи и одного из четырех указанных выше источников.

Авторы приходят к следующим выводам:

1) солнечные панели – наиболее эффективные источники электропитания для маломощных удаленных от централизованной сети устройств в силу независимости от режимов работы ВЛ, универсальности применения, надежности работы и низкой себестоимости;

2) трансформаторы напряжения – наиболее бесперебойные источники электропитания ввиду постоянства подключения к ВЛ, но в то же время дорогостоящие по сравнению с солнечными панелями (в 40 раз);

3) трансформаторы тока – оптимальный вариант для питания оборудования под потенциалом провода, активно применяется для автономных датчиков [3, 4];

4) ветрогенератор является малоэффективным и затратным в эксплуатации решением.

Однако невозможно не учитывать неустойчивость солнечных панелей к загрязнению [5], а в климате побережий – неустойчивость к оледенению, приводящих к снижению мощности, вырабатываемой солнечным модулем. Это накладывает ограничения на применение данного источника питания.

В свою очередь, основными недостатками трансформатора напряжения являются:

- громоздкость конструкции применительно для ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения;
- капитальное строительство стойки для установки трансформатора;
- контактное присоединение к ВЛ в сочетании с недоступностью к осмотру дежурным персоналом, вкупе с гололедно-ветровыми нагрузками приводящее к возможной аварии [6].

Получить основное достоинство трансформаторов напряжения – бесперебойность электропитания от ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения – и исключить при этом их основные недостатки возможно при использовании наведенного фазными проводами ВЛ напряжения.

В подавляющем большинстве работы по исследованию наведенного напряжения ограничиваются вопросами электробезопасности [7-9] и человеческого здоровья [10] и не затрагивают вопросы возможности электропитания наведенным напряжением ВЛ.

Однако применение устройств отбора мощности от ВЛ наведенным напряжением изучалось еще в советской науке [11]. Автор работы рассматривает установки антенного емкостного отбора электроэнергии от ВЛ, уже установленные в электрических сетях, и дальнейший потенциал их применения. Работа затрагивает также вопросы проектирования, в частности выбор места расположения антенны, выполненной в виде отдельного проводника, подвешенного на ВЛ, и ее длины для получения требуемого напряжения и емкости антенны, оптимальные условия работы схемы антенного отбора мощности и описывает методику расчета установок антенного отбора.

В рамках указанной работы не решены важные вопросы:

1) влияние заземленных конструкций ВЛ с металлическими и железобетонными опорами на величину напряжения и мощности установки отбора;

2) схемы установок антенного отбора со стабилизацией напряжения при изменении нагрузки с использованием стандартных трансформаторов.

Аналогично данные вопросы не рассматриваются в работе [12], где предлагается использовать источник электропитания наведенным напряжением для экстренных ситуаций.

Также известны запатентованные технические решения, касающиеся антенной части установки отбора мощности [13, 14]. В них предлагается регулировать напряжение на антенной части устройства путем изменения геометрического расположения

провода антенны относительно ВЛ и, кроме того, регулировать значение снимаемой с антенны мощности путем изменения ее длины за счет соединения перемычками отдельных ее участков.

Данные устройства имеют общие недостатки:

1) длинная линейная часть антенны, занимающая три и более промежуточных пролета ВЛ для съема мощности от 30 Вт и выше, которая усложняет монтаж и ремонт устройства и увеличивает вероятность аварии, связанной с гололедно-ветровыми нагрузками и схлестыванием с фазными проводами;

2) высокая стоимость такой линейной части относительно других решений (например, солнечных панелей);

3) снижение надежности при использовании устройств, изменяющих расположение и длину антенны.

Таким образом, в рамках исследования авторами поставлены следующие задачи:

1) определить зависимость напряжения и емкости антенны от ее расположения на ВЛ с учетом влияния заземленных элементов конструкции опор;

2) разработать схему и методику расчета величины наведенного напряжения и емкости антенны для устройств электропитания наведенным напряжением;

3) определить концепцию исполнения преобразующе-стабилизирующего блока источника электропитания.

1. Материалы и методы

Общая схема работы устройства электропитания наведенным напряжением

Устройство антенного отбора мощности от фазных проводов ВЛ представляет собой изолированный проводник, подвешенный на определенной высоте, который подключается через преобразующе-стабилизирующий блок к электроприемникам. Физические основы работы заключаются в следующем: при включении линии на рабочее напряжение электрическое поле линии наводит в антенне некоторое высокое напряжение, зависящее от расположения проводников линии и самой антенны. Через

емкости, распределенные между фазными проводниками и антенной, на антенну стекает электрический ток, который питает нагрузку. Иллюстрация данного способа отбора мощности представлена на рис. 1.

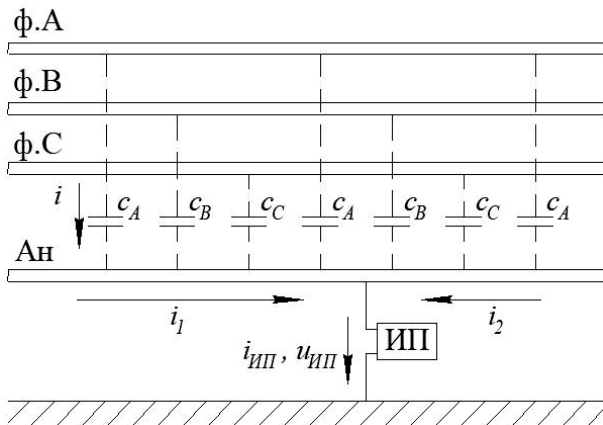


Рис. 1. Антенный отбор мощности: функциональная схема антенного отбора мощности; ф.А, ф.В, ф.С – фазные провода, Ан – антенна; ИП – источник электропитания

Мощность устройства зависит от величины наведенного напряжения и емкости антенны по отношению к фазным проводам и земле. Чтобы составить методику определения этих величин, рассмотрим случай однофазной воздушной линии и антенны конечной длины.

Схема замещения источника электропитания наведенным напряжением от однофазной ВЛ. Расчетные соотношения. Эксперимент

Данный пример представляет собой воздушную линию электропередачи с одним фазным проводником, подвешенным

на опорах, и разземленной антенной. Ноль системы заземлен.

Очевидно, что наведенное напряжение и емкость антенны тем выше, чем ближе антенна и фазный проводник, и чем больше поверхность антенны. Согласно [11] наведенное напряжение определяется величиной фазного напряжения и соотношением емкости между фазным проводом и антенной и собственной емкости антенны по отношению к земле согласно формуле

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{U}_\Phi \cdot C_{\Phi A}}{C_{AA} + C_{\Phi A}}, \text{ В}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_A$ – напряжение, наведенное в антенне; $\dot{U}_\Phi$ – фазное напряжение, В; $C_{\Phi A}$ – емкость между фазным проводом и антенной, Ф; C_{AA} – собственная емкость антенны по отношению к поверхности земли, Ф.

Если игнорировать влияние заземленных конструкций опор ВЛ, то задача сводится к определению емкости цилиндрического провода относительно другого провода и относительно плоскости земли. Это справедливо для опор из диэлектрических материалов с незаземленными траверсами, например деревянных или композитных. Однако для опор с металлическими и железобетонными стойками необходимо учитывать их влияние на емкость.

На рис. 2 представлена схема замещения такой ВЛ с заземленными опорами. Влияние заземленных конструкций учитывается введением дополнительных емкостей: емкость антенны относительно опоры, через которую проходит антенна, и емкость антенны относительно конечной опоры.

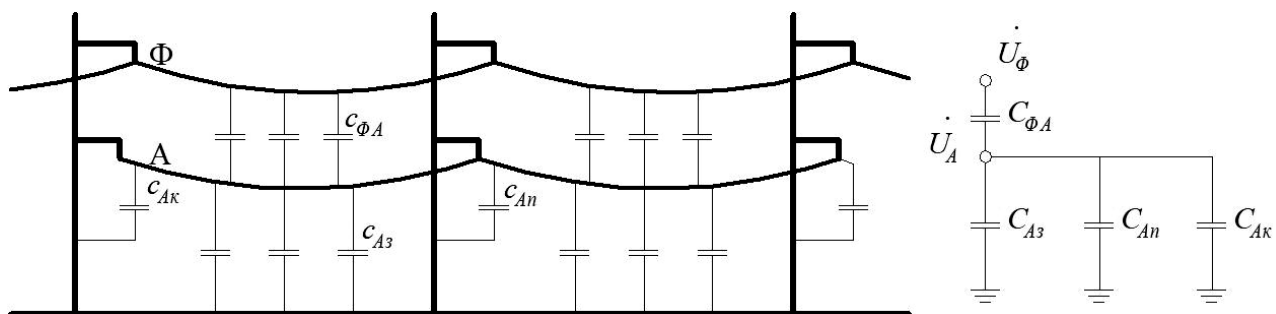


Рис. 2. Схема замещения однофазной ВЛ с антенной и заземленными опорами: Ф – фазный провод, А – антенна

Таким образом, емкости определяются формулами:

$$C_{\Phi A} = c_{\Phi A} \cdot l_A, \Phi; \quad (2)$$

$$C_{AA} = c_{A3} \cdot l_A + c_{An} \cdot (n-2) + c_{Ak} \cdot 2, \Phi, \quad (3)$$

где $c_{\Phi A}$ – частичная емкость между фазным проводом и антенной, Ф/м; c_{A3} – частичная емкость между антенной и землей, Ф/м; c_{An} – емкость между антенной и проходной опорой, Ф; c_{Ak} – емкость между антенной и конечной опорой, Ф; n – число опор, на которых расположена антенна; l_A – длина антенны.

Частичные емкости $c_{\Phi A}$ и c_{A3} определяются по известным формулам:

$$c_{\Phi A} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{d_{\Phi A}^2}{r_{\Phi} \cdot r_A}}, \Phi/\text{м}; \quad (4)$$

$$c_{A3} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{2d_{A3}}{r_A}}, \Phi/\text{м}, \quad (5)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, $8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $d_{\Phi A}$ – расстояние между фазным проводником и антенной, м; d_{A3} – расстояние между антенной и плоскостью земли, м; r_{Φ} – радиус фазного провода, м; r_A – радиус провода антенны, м.

Поскольку существует провес провода, в расчетах будем приводить высоту провода с учетом стрелы провеса, чтобы представить провода как цилиндрические (по формуле)

$$h_s = h \cdot e^{-0,67 \frac{f}{h}}, \text{ м}, \quad (6)$$

где h_s – эквивалентная высота подвеса провода, м; h – высота точки подвеса провода, м; f – стрела провеса в середине пролета, м.

Емкости c_{An} и c_{Ak} предлагается моделировать, например, в программной среде COMSOL Multiphysics. Применение данного ПО для моделирования электромагнитных полей линий электропередачи представлено в [15]. Трехмерная модель для определения емкости c_{Ak} содержит опоры, конечную для рассматриваемой

антенны, элементы изоляции (изоляторы, воздушные промежутки), собственно антенну и блок, представляющий воздушное пространство, в котором распространяется электрическое поле. Трехмерная модель для определения c_{An} представляет собой опору ВЛ, проходную для рассматриваемой антенны, и содержит аналогичные элементы предыдущей модели. В обеих моделях оси провода антенны задано значение переменного потенциала U_{Φ} . Нижней поверхности блока и оси опоры задан нулевой потенциал. Каждому блоку присвоены исходные материалы с их электрическими свойствами. Для работы используется блок физики Electric Currents.

Значение тока, который стекает на моделируемую опору, определим путем интегрирования плотности тока по длине оси опоры. Зная значение тока и напряжения, можно определить емкость между антенной и опорой:

$$C = \frac{I}{U \cdot \omega}, \Phi, \quad (7)$$

где ω – циклическая частота напряжения, рад.

Для подтверждения принципов определения величины наведенного напряжения произведено экспериментальное наблюдение рассматриваемого явления. Построена упрощенная физическая модель однофазной ВЛ, состоящая из изолированного фазного провода сечением $2,5 \text{ мм}^2$, изолированного провода-антенны сечением $2,5 \text{ мм}^2$, опор, изоляционного материала для крепления проводов к опорам. Опоры, представляющие собой стальные стержни диаметром 3,5 мм, установлены в увлажненную землю на глубину 800 мм, высотой над поверхностью земли 120 мм. Общее количество опор – 7 шт. Длина линии – 4 метра. Провода вывешены на опоры со стрелой провеса и зафиксированы неподвижно. Фазный провод вывешен над проводом-антенной. Высота точки подвеса фазного провода 103_{-13}^{+7} мм, стрела провеса фазного провода 27_{-13}^{+14} мм. Высота точки подвеса

антенны 86_{-11}^{+8} мм, стрела провеса провода-антенны 27_{-19}^{+14} мм. Схема данной модели представлена на рис. 3. Измерения произ-

водились с помощью цифрового вольтметра MS8221C (приведенная погрешность прибора $\pm 1\%$, предел измерений 600 В).

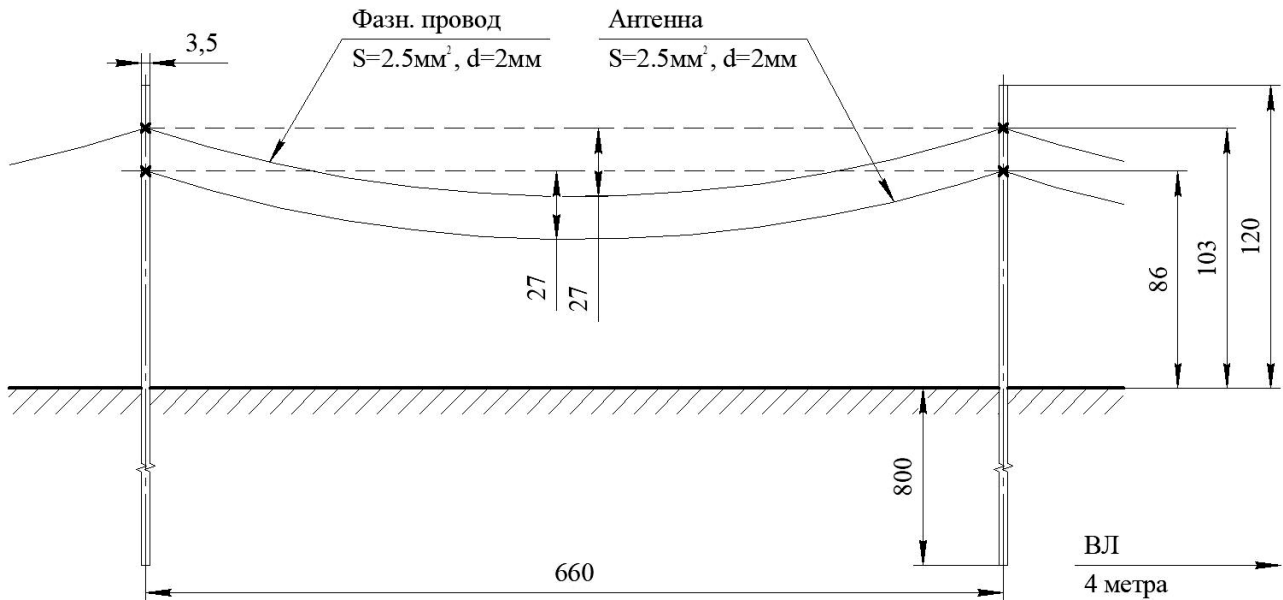


Рис. 3. Схема опытной однофазной ВЛ с антенной

Схема замещения источника электропитания наведенным напряжением от трехфазной ВЛ. Расчетные соотношения.

При составлении программной модели реальной трехфазной ВЛ нужно учитывать следующие факторы:

1) номинальное напряжение ВЛ: антенна не должна сближаться с фазными проводами на расстояние менее указанного в ПУЭ;

2) количество цепей ВЛ: одноцепные и двухцепные;

3) расположение фазных проводов ВЛ: рядное, «ёлочкой», «бочкой» и т. д.;

4) количество антенн и расстояние между ними.

В данном случае на напряжение и емкость антенны, кроме сближения антенны с одной из фаз, уменьшения емкости между антенной и опорой, влияет также удаление антенны от других фаз.

Схема замещения источника электропитания наведенным напряжением от трехфазной одноцепной ВЛ представлена на рис. 4.

Определим параметры схемы с помощью теоремы об эквивалентном генераторе:

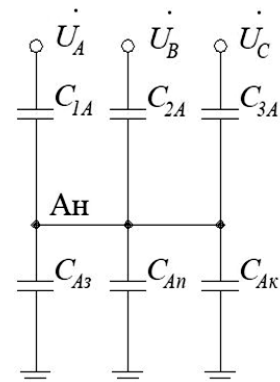


Рис. 4. Схема замещения трехфазной ВЛ с антенной

По этой схеме напряжение антенны определяется емкостями между фазными проводами и антенной по формуле

$$\dot{U}_A = \frac{\sum_{m=1}^{m=n} \dot{U}_m \cdot C_{mA}}{C_{AA} + \sum_{m=1}^{m=n} C_{mA}}, \text{ В.} \quad (8)$$

Ток короткого замыкания:

$$\dot{I}_k = \sum_{m=1}^{m=n} \dot{U}_m \cdot \omega \cdot C_{mA}, \text{ А.} \quad (9)$$

Внутренняя эквивалентная емкость:

$$C_{\mathfrak{I}} = \frac{|\dot{I}_k|}{\omega \cdot |\dot{U}_A|}, \Phi. \quad (10)$$

[illegible]

где q_k – заряд проводника; U_k – напряжение проводника.

Для случая длинных проводников, протянутых параллельно друг другу в воздухе над поверхностью земли, собственные потенциальные коэффициенты вычисляются по формуле

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_k}{R_k}, \text{ M}/\Phi, \quad (12)$$

где h_k – высота подвеса провода, м; R_k – радиус провода, м.

Взаимные потенциальные коэффициенты

$$\alpha_{kp} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{kp'}}{r_{kp}}, \text{ M}/\Phi, \quad (13)$$

где r_{kp} — расстояние между проводом k и зеркальным изображением провода p , м; r_{kp} — расстояние между проводом k и проводом p , м.

Матрица потенциальных коэффициентов A системы (11) преобразуется в матрицу коэффициентов электростатической индукции B по формуле

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}. \quad (13)$$

Особенностью расчета емкостей между проводами в данном случае является расчет частичных емкостей с помощью системы уравнений Максвелла для потенциальных коэффициентов:

Из матрицы В определяем частичные емкости по формулам:

$$c_{kk} = \beta_{k1} + \beta_{k2} + \dots + \beta_{kn}; \quad (14)$$

$$c_{kp} = -\beta_{kp} \text{ ,} \quad (15)$$

где c_{kk} – собственная частичная емкость, Ф/м; c_{kp} – взаимная частичная емкость, Ф/м; β_{kk} – собственный коэффициент электростатической индукции, Ф/м; β_{kp} – взаимный коэффициент электростатической индукции, Ф/м.

Частичные емкости C_{An} и C_{AK} , связанные с опорами, определены с помощью моделирования. В среде COMSOL Multiphysics построена трехмерная упрощенная модель металлической опоры П110-5В для одноцепной ВЛ-110 кВ с антенной, выполненной самонесущим изолированным проводом СИП-5 сечением 50 мм².

2. Результаты. Эксперимент

В ходе указанного выше опыта на физической модели однофазной ВЛ были проведены три серии замеров величины напряжения антенны в начале и в конце провода с контролем входного фазного напряжения. Ниже приведена таблица измерений и средние значения напряжения (табл. 1).

Таблица 1 – Измерения наведенного напряжения

Напряжение	U_{ϕ} , В	$U_{A,нач}$, В	$U_{A,кон}$, В	$U_{A,ср}$, В
1	230	14,5	15,6	15,05
2	232	14,7	16,7	15,7
3	236	16,6	16,2	16,4
$\bar{U}$	233	15,3	16,1	15,7

Расчет и моделирование наведенного напряжения на антенне на однофазной ВЛ

Для теоретического обоснования результатов эксперимента произведем расчет по рассмотренной выше методике.

Для проводов в эксперименте:
 $h_{\phi} = 86,6$ мм; $h_{\Delta} = 69,9$ мм.

Частичные емкости (4), (5):

$$c_{\phi\Delta} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{d_{\phi\Delta}^2}{r_{\phi} \cdot r_{\Delta}}} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{0,0167^2}{0,001 \cdot 0,001}} = 9,8798 \cdot 10^{-12}, \text{Ф/м};$$

$$c_{\Delta\Delta} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{2d_{\Delta\Delta}}{r_{\Delta}}} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{2 \cdot 0,0699}{0,001}} = 1,1257 \cdot 10^{-11}, \text{Ф/м}.$$

Произведем моделирование емкости для проходной опоры. Оси провода задано значение переменного потенциала $U_{\phi} = 235$ В. На рис. 5 и 6 показано распределение электрического потенциала в пространстве в двух плоскостях.

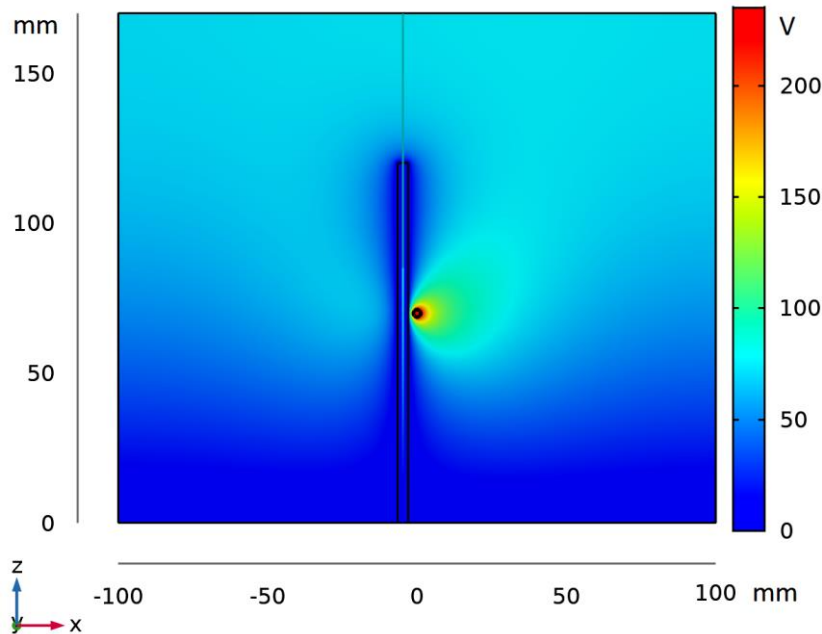


Рис. 5. Распределение электрического потенциала в плоскости, перпендикулярной ВЛ, для проходной опоры

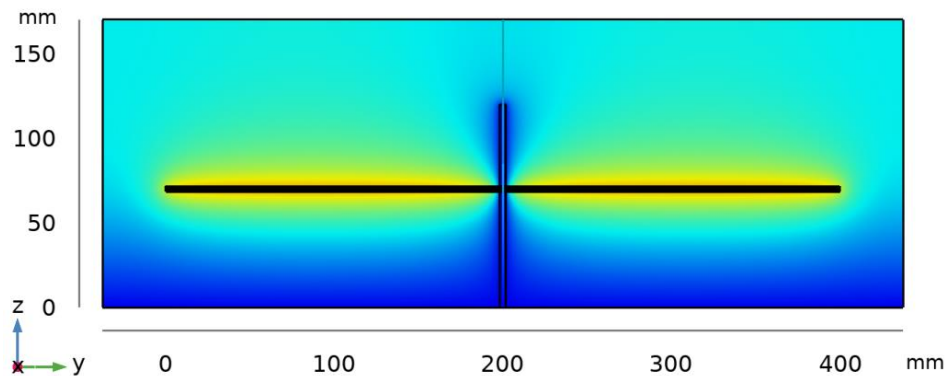


Рис. 6. Распределение электрического потенциала в плоскости оси визирования ВЛ для проходной опоры

Модель для концевой опоры строится аналогично, картина поля показана на рис. 7 и 8.

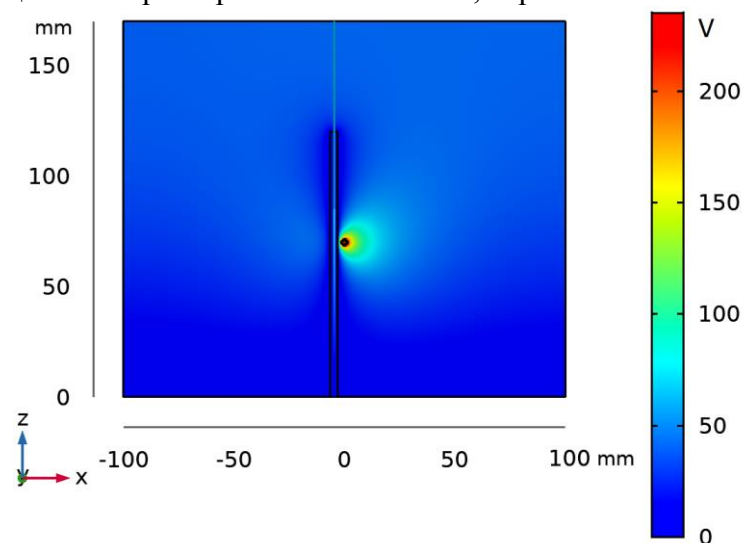


Рис. 7. Распределение электрического потенциала в плоскости, перпендикулярной ВЛ, для концевой опоры

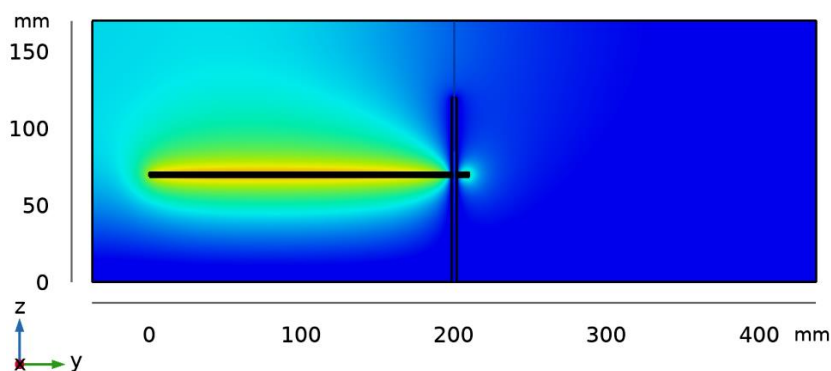


Рис. 8. Распределение электрического потенциала в плоскости оси визирования ВЛ для концевой опоры

Результаты расчета и моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчета и моделирования емкостей

$c_{\Phi A}$, Ф/м	c_{A3} , Ф/м	I_{An} , А	c_{An} , Ф	I_{Ak} , А	c_{Ak} , Ф
$9,8798 \cdot 10^{-12}$	$1,126 \cdot 10^{-11}$	$5,1852 \cdot 10^{-6}$	$7,027 \cdot 10^{-11}$	$3,9755 \cdot 10^{-6}$	$5,3876 \cdot 10^{-11}$

По формулам (2) и (3) получим значения емкостей, по формуле (1) – напряжение антенны:

$$\begin{aligned}
 C_{\Phi A} &= c_{\Phi A} \cdot l_A = 3,9519 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}; \\
 C_{AA} &= c_{A3} \cdot l_A + c_{An} \cdot (n - 2) + c_{Ak} \cdot 2 = \\
 &= 1,126 \cdot 10^{-11} \cdot 4 + 7,027 \cdot 10^{-11} \cdot (7 - 2) + 5,3876 \cdot 10^{-11} \cdot 2 = 5,0414 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}; \\
 \dot{U}_A &= \frac{\dot{U}_{\Phi} \cdot C_{\Phi A}}{C_{AA} + C_{\Phi A}} = \frac{233 \cdot 3,9519 \cdot 10^{-11}}{5,0414 \cdot 10^{-10} + 3,9519 \cdot 10^{-11}} = 16,9 \text{ В}.
 \end{aligned}$$

Погрешность расчета по сравнению с экспериментальными данными составила 7,8 %.

Расчет и моделирование наведенного напряжения на антенне на трехфазной ВЛ

Картина поля трехмерной упрощенной модели для металлической опоры П110-5В

для одноцепной ВЛ-110 кВ с антенной, выполненной самонесущим изолированным проводом СИП-5 сечением 50 мм^2 , показана на рис. 9 и 10.

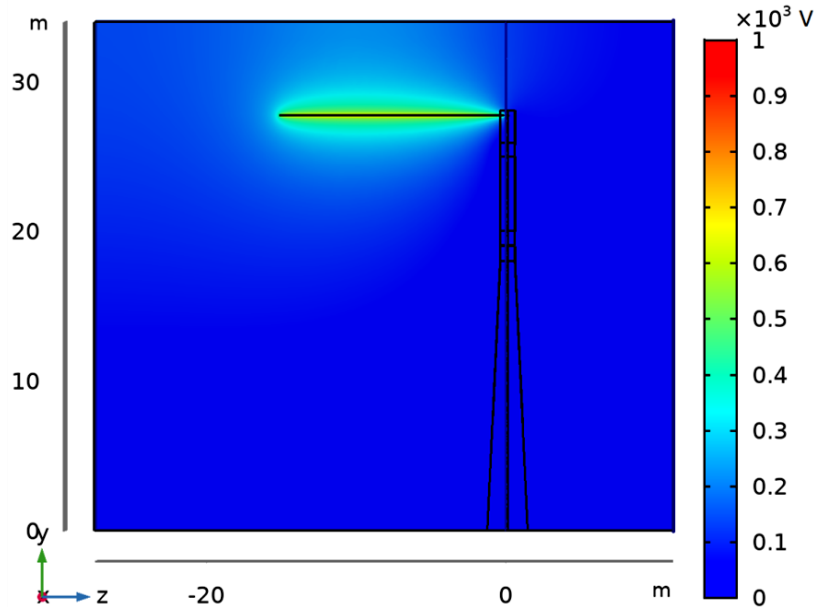


Рис. 9. Распределение электрического потенциала в плоскости оси визирования ВЛ для концевой опоры

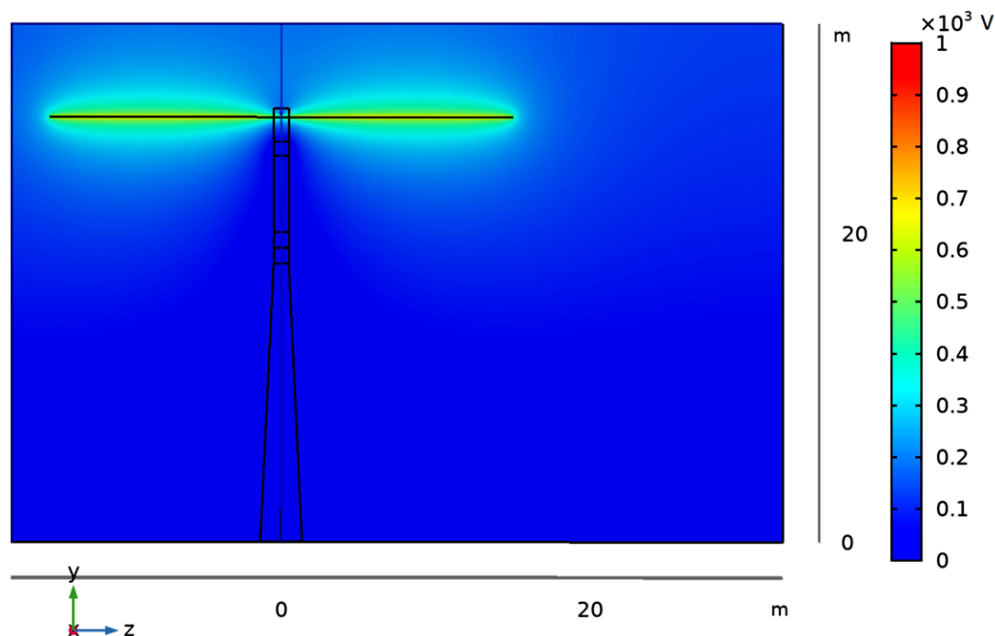


Рис. 10. Распределение электрического потенциала в плоскости оси визирования ВЛ для проходной опоры

Расчет и моделирование были произведены для антенн, подвешенных на высоте 15,11 м (расстояние 3 м от фазного провода), 16,61 м (расстояние 1,5 м от фазного

провода) и 27,75 м (точка подвеса грозотроса). Длина антенны – 1 км, количество занимаемых пролетов – 5 шт. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчета и моделирования наведенного напряжения на трехфазной одноцепной ВЛ 110 кВ

Номер антенны	1	2	3
Высота подвеса h , м	15,11	16,61	27,75
h_3 , м	12,94	14,42	25,5
c_{1A} , пФ/м	0,6173	0,7127	1,7612
c_{2A} , пФ/м	0,9605	1,0115	0,6663
c_{3A} , пФ/м	1,7125	2,3488	0,721
c_{A3} , пФ/м	4,302	3,8265	3,888
c_{AK} , пФ	3943,8	4375,9	5403,6
c_{An} , пФ	8919,5	9142,2	8917,1
c_{AA} , пФ	38948,5	40004,7	41447
U_a , кВ	1,46	2,17	1,52
I_k , мА	19,35	30,09	21,31
C_3 , пФ	42238,8	44077,8	44595,5

Заключение

1. Определены теоретические соотношения, позволяющие учитывать емкость между опорой ВЛ и антенной, в сумме определяющие методику расчета наведенного напряжения антенны и ее эквивалентной емкости.

2. Получены трехмерные модели электрического поля воздушной линии электропередачи, позволяющие определить влияние заземленных конструкций опоры ВЛ на значение наведенного напряжения антенны.

3. Экспериментально показано, что заземленные конструкции уменьшают наведенное напряжение и снимаемую с ВЛ мощность.

4. Определено, что для получения наибольшей величины наведенного напряжения и эквивалентной емкости необходимо уменьшать расстояние ее до одной из фаз, увеличивать расстояния между антенной и остальными фазами, землей, умень-

шать емкости между антенной и заземленными конструкциями ВЛ.

5. Для определения расчетной полезной мощности, которую можно снять с антенны, необходимо учитывать схему преобразующе-стабилизирующего блока источника электропитания, находящегося в резонансе с антенной.

Благодарности. Работа, по результатам которой написана статья, выполнена по Договору № 13937ГУ/2019 от 25 апреля 2019 г. в рамках конкурса «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.»).

Acknowledgments. The work, according to the results of which the article was completed, was carried out under Contract № 13937ГУ/2019 dated April 25, 2019 within the framework of the competition «Participant of the youth scientific and innovative competition» («U.M.N.I.K.»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях: монография / В.Я. Башкевич, Г.Г. Угаров, П.А. Кузнецов и др. Саратов: СГТУ, 2013. 244 с.

2. **Кузнецов П.А.** Выбор источников электропитания для постов мониторинга воздушных линий электропередачи, рас-

полагаемых в Саратовской области / П.А. Кузнецов, С.П. Максимов // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (Трансэнергоком – 2018): сб. науч. тр. по материалам Всерос. науч.-практ. конф.: в 2 т. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 51-54.

3. **Кузнецов П.А.** Автономный датчик контроля гололедных нагрузок на воздушную линию электропередачи / П.А. Кузнецов, И.А. Щербаков // Вопросы надежности работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Уфим. гос. авиац. ун-т. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. С. 29-36.

4. **Панасенко М.В.** Устройство отбора мощности для питания систем мониторинга линий электропередачи / М.В. Панасенко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 3(15). С. 34-38.

5. Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust and Particulate Air Pollution / Mike H. Bergin, Chinmay Ghoroi, Deepa Dixit [et al.] // Environmental Science & Technology Letters. 2017. № 4. P.339-344.

6. Impact & mitigation of icing on power network equipment / Thorne & Derrick International // Thorne & Derrick International Blog. URL: <https://www.powerandcables.com/impact-mitigation-of-icing-on-power-network-equipment/> (дата обращения: 09.01.2021).

7. Экспериментальные исследования наведенных напряжений на ВЛ 110-500 кВ / В.В. Леднев, В.А. Андронов, С.В. Нестеров и др. // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: сб. докл. Третьей Российской науч.-практ. конф. с междунар. участием. Новосибирск, 2008. С. 142-149.

8. **Казакул А.А.** Анализ методов расчета наведенного напряжения на линиях электропередачи / А.А. Казакул, К.И. Сцепуро // Вестник АмГУ. 2018. № 81. С. 58-63.

9. Computation of the potential induced on the fluid transport pipelines by overhead high voltage lines / A. Racasan, C. Munteanu, T. Vasilie [et al.] // Environmental Engineering and Management Journal. 2011. № 10. P. 505-510.

10. Health-Related Electromagnetic Field Assessment in the Proximity of High Voltage Power Equipment / M. Frigura-Iliasa, F.I. Baloi, F.M. Frigura-Iliasa [et al.] // Applied Sciences. 2020. № 10 (1). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/1/260/html> (дата обращения: 11.01.2021).

11. **Юренков В.Д.** Антенный емкостный отбор энергии от линий электропередачи / В.Д. Юренков // Электричество. 1952. № 7. С. 32-40.

12. **Котляров Д.Ю.** Применение устройств бесконтактного отбора мощности от местных электросетей в интересах спасательных подразделений МЧС России / Д.Ю. Котляров, Д.Ф. Лавриненко // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2018. № 1 (36). С. 57-61.

13. Патент на полезную модель РФ № 74240. Устройство отбора электрической энергии от воздушных линий электропередачи / Д.Н. Удинцев, Г.Н. Щербаков, М.А. Анцелевич и др. // МПК H01F 21/04 (2006.01), 2007.

14. Патент на полезную модель РФ № 133968. Устройство отбора электрической энергии от воздушных линий электропередачи / Д.Н. Удинцев, В.Н. Тульский, П.К. Милованов // МПК H01F 21/04 (2006.01), 2013.

15. **Alirachedi B.** A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using COMSOL MULTIPHYSICS / B. Alirachedi, Ab. Babouri, F. Berrouk // International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). Tunis, Tunisia, 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/274509444_A_study_of_electromagnetic_field_generated_by_high_voltage_lines_using_COMSOL_MULTIPHYSICS (дата обращения: 20.01.2021).

Максимов Сергей Петрович – инженер ООО «НТЦ Инструмент-микро»

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

Sergey P. Maksimov – Engineer, STC Instrument-micro LCC

Pavel A. Kuznetsov – Ph.D., Department of Power Engineering and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Technical Director, STC Instrument-micro LCC

Статья поступила в редакцию 05.02.2021, принята к опубликованию 24.02.2021

УДК 620.9:62-93

ЦИФРОВОЙ ТРЕНД ОТРАСЛЕВОГО ИНЖИНИРИНГА В ЦЕЛЯХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЯ

В.Е. Михайлов

A DIGITAL TREND IN SECTORIAL ENGINEERING AIMED AT SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ELECTRIC POWER AND POWER-PLANT INDUSTRIES

V.Ye. Mikhailov

Показана связь идеологии устойчивого развития общества и приоритетных направлений инновационных технологий, включая цифровые, реализация которых обеспечивает продвижение к решению глобальных задач, приобретающих статус национальных целей. Приведены данные об отраслевых наработках в области цифровых технологий и математического моделирования, а также определены задачи на перспективу, в частности продвижение от базы данных к базе знаний за счет использования цифровых двойников. Делается вывод о направленности цифрового тренда отраслевого инжиниринга на обеспечение устойчивого развития энергетики и энергомашиностроения.

Ключевые слова: цифровые технологии; цифровой тренд; интеллектуальные системы, моделирование; цифровые двойники, базы знаний

Глобальные события 2020 года продемонстрировали всему миру актуальность 17 целей устойчивого развития, сформулированных ООН в 2015 году. По определению ООН, устойчивое развитие заключается в том, чтобы действия нынешнего поколения не шли вразрез с интересами будущих поколений и были направлены на ликвидацию нищеты, сохранение ресурсов планеты и обеспечение благополучия.

The paper shows the relationship between the ideology of sustainable development of society and prioritized areas of innovative technologies, including the digital technologies. Their implementation will ensure a progress towards the solution of global problems that acquire the status of national goals.

The author provides the data relating sectorial developments in the field of digital technologies and mathematical modeling, as well as defines the tasks for a future research, particularly, advancement from the database to the knowledge base through the use of digital twins. The main conclusion refers the trends in digital engineering aimed at ensuring sustainable development of electric power and power-plant industries.

Keywords: digital technologies; digital trend; intelligent systems, modeling; digital twins, knowledge bases

Задача, конечно, масштабная, требует глобального партнерства, и, как выразился наш новый представитель Президента в ООН, «Устойчивое развитие – это цельное описание задач страны, которое шире, чем просто экономика, бизнес или даже уровень жизни. Это что-то новое из XXI века, апгрейд фундаментальных идей классиков».

В этой связи на уровне ООН рассматривается концепция устойчивого развития

во всех сферах хозяйствования, в том числе в отраслях ТЭК: энергетике и энергомашиностроении.

Среди факторов, определяющих устойчивость и соответствующее интересам Общества инновационное развитие, энергетики называют цифровые технологии.

В рамках международного форума «Российская энергетическая неделя» (РЭН-2018) были обозначены основные факторы устойчивого развития энергетики, причем на первое место выведен фактор «цифровые технологии» (наряду с этим – безуглеродные топливные системы, новые способы применения энергии).

Развитием данной позиции стал тот факт, что в повестку дня РЭН-2019 была включена тема: «Цифровую трансформацию не остановить».

Таким образом, одним из главных трендов в сфере устойчивости развития энергетики, а значи, и отраслевого инжиниринга, выкристаллизовывается «Цифровой тренд».

Начиная с 2018 года, задача обеспечения ускоренного внедрения цифровых технологий приобрела статус национальной цели в рамках стратегических задач развития РФ до 2024 г., причем это распространилось на экономику в целом и социальную сферу (Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204).

Этим же указом в качестве целевых показателей определено «преобразование приоритетных отраслей экономики и социальной сферы, включая промышленность и энергетическую инфраструктуру, ... посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений».

В соответствии с Указом была разработана Национальная программа «Цифровая экономика РФ», в состав которой вошли шесть федеральных проектов, в том числе «Цифровые технологии: нормативное регулирование цифровой среды, информационная инфраструктура, кадры для цифровой экономики, информационная безопасность, цифровые технологии, цифровое государственное управление».

Период реализации Национальной программы совпал с распространением коро-

навирусной инфекции, в результате чего активизировались процессы обращения к цифровым технологиям в областях государственного управления, образования, медицины, сервиса и т. д. При этом выявилась масса проблем, требующих неотложного решения: обеспечение повсеместного доступа к сети Интернет, подключение к ней социально значимых объектов, задача разработки и поддержки отечественного программного обеспечения, уровень защиты информации, персональных данных и многое другое.

Национальная программа претерпела ряд корректировок. С одной стороны, возросла актуальность сферы цифровизации, подтверждением чего стал Указ Президента от 21.07.2020 г. № 474, в котором понятие «цифровая трансформация» вошло в перечень долгосрочных национальных целей развития РФ (на период до 2030 г.). С другой стороны, целевая направленность Программы сфокусировалась на решении практических задач и получении быстрых результатов. Приоритетные направления цифровой трансформации: **обеспечение доступа к быстрому Интернету на всей территории страны, формирование цифровых навыков, подготовка квалифицированных кадров для IT-отрасли, безопасность данных, поддержка IT-отрасли, цифровизация госуправления.**

Можно подвести некоторые итоги выполнения программы «Цифровая экономика»:

– За два года реализации проекта обеспечены высокоскоростным доступом в интернет около 50 социально значимых объектов. В их числе – более 15,6 тысячи образовательных организаций, более 7,4 тысячи объектов органов государственной власти и местного самоуправления, 3 тысячи избирательных комиссий, около 400 организаций культуры [1].

– Подведены итоги конкурсного отбора заявок на гранты по развитию «сквозных» цифровых технологий в 2019 году [2]. Конкурсы рассчитаны на разные категории участников: от небольших команд до крупного бизнеса. Организаторами

конкурсов выступили: Фонд «Сколково» (34 заявки, из которых отобрано шесть пилотных проектов по внедрению решений на российский рынок); Российский фонд развития информационных технологий (РФРИТ, 118 заявок, 13 из них получают гранты на поддержку региональных предприятий.); Фонд содействия инновациям (822 заявки, 197 из них получают грантовую поддержку) и Минпромторг России, который поддерживает промышленные цифровые решения (349 заявок, 79 грантов). Обязательным условием получения грантов была приоритетность отечественного производителя.

В сентябре 2020 г. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ объявило о запуске новых конкурсов на получение грантовой поддержки для проектов по разработке и внедрению российских цифровых решений, на которые было выделено 7,1 млрд руб. [3].

Подытоживая изложенные материалы, можно констатировать, что цифровизация (или численные методы и технологии) уверенно входят в нашу жизнь.

Так что же это означает для инженерной деятельности в энергетике и энергомашиностроении?

ОАО «НПО ЦКТИ» (далее – НПО ЦКТИ) – предприятие, всемирно известное под названием Центральный котлотурбинный институт им. И.И. Ползунова, создано в Ленинграде более 90 лет назад для реализации планов электрификации страны (план ГОЭЛРО) усилиями ведущих ученых того времени в качестве научно-технической базы отечественного энергомашиностроения.

В настоящее время НПО ЦКТИ работает в области энергетического машиностроения, большой и малой энергетики, судостроения, нефтехимии, газовой и других отраслей.

Проводятся исследования и разработки новых эффективных энергетических технологий и оборудования нового поколения, в том числе для экспортных поставок, а также испытания головных и серийных образцов энергооборудования на стендах

собственной экспериментальной базы и на электростанциях по решению проблем в соответствии с вызовами времени.

В современной обстановке это означает, что отраслевой инжиниринг должен быть ориентирован в направлении цифровых технологий и интеллектуальных энергетических систем.

Развитие инженерной мысли и технологий во всем мире проходит примерно в одних и тех же этапы. Это развитие методов проектировочных и поверочных расчетов, накопление экспериментальных данных, экспериментальная верификация прогнозных расчетов, постановка углубленных опытных работ, фундаментальных исследований, последующее обобщение экспериментальных данных, создание новых методик; это развитие от одномерных, приближенных методов расчета к 2- и 3-мерным. Естественно, что если простые одномерные методы могли быть реализованы и с помощью логарифмической линейки и затем простейших калькуляторов и счетных машин, то 2- и 3-мерное моделирование стало возможным при использовании электронных вычислительных машин.

НПО ЦКТИ активно участвует в развитии численного моделирования оборудования и процессов начиная с середины прошлого века. Такие технологические системы проектирования и конструирования как САПР получили и свое теоретическое обоснование, и практическое применение в интересах КБ и заводов отрасли под руководством и с участием специалистов различных агрегатных отделов. В институте уже с середины 70-х годов прошлого века активно разрабатывались методы конечно-элементного моделирования и 3-мерных расчетов процессов течения рабочего тела, теплообмена и напряженно-деформированного состояния элементов оборудования.

НПО ЦКТИ работал совместно с отраслевыми институтами и заводами над внедрением в процессы проектирования методов двумерного расчета проточных частей, методов расчета теплообменного оборудования, методов проектирования конденсаторов (САПР Конденсатор), норм расчета

котельных агрегатов и соответствующей системы автоматизированного проектирования.

НПО ЦКТИ сумел обеспечить преемственность в развитии методов и методик, сохранение основных направлений экспериментальных исследований, что позволяет нам участвовать и в дальнейшем развитии численных методов и в расширении областей их применения, в частности используя эти методы для планирования и обработки экспериментальных исследований и для прогнозирования состояния и поведения энергетических установок. Для решения последней задачи применяется метод создания цифрового двойника (ЦД) оборудования.

Согласно [4], ЦД – это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними, то есть ЦД создает виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом».

Полноценный цифровой двойник оборудования должен откликаться на те же изменения параметров, что и натурный механизм, и этот отклик должен быть аналогичным. Создание полноценного цифрового двойника энергетического оборудования в настоящий момент времени сопряжено с необходимостью решить большое количество организационных и научно-технических вопросов, требует значительного финансирования, существенного времени при отсутствии гарантированного успеха.

Создание ЦД такого сложного оборудования, как, например, паровая турбина, требует масштабных исследований, набора большого объема статистической эксплуатационной информации, информации о проведенных ремонтах, модернизации, обслуживании и пр.

Существуют несколько типов ЦД. Обычно рассматриваются и наиболее часто

используются два из них: цифровой двойник – прототип (ЦДП) и цифровой двойник – экземпляр (ЦДЭ). Первый является виртуальным аналогом реального объекта, содержащим обширные геометрические данные, информацию о применяемых материалах, математические модели физических процессов. Второй дополнен эксплуатационными данными, статистическими данными об отказах, ремонтах, модернизациях, заменах узлов с привлечением методов машинного обучения.

Для осознания многих проблем и нахождения путей их решения мы начинаем с попытки создания цифрового двойника для оборудования, хорошо изученного – экспериментальной турбины низкого давления стенда НПО ЦКТИ для исследования моделей проточных частей низкого давления (стенд ЭТНД-2).

Применительно к модельной турбине стенда ЭТНД-2, ЦДП будет создан на основе фундаментальных математических моделей физических процессов, протекающих в агрегате при работе, и подробных данных о геометрии и конструктивных особенностях модельной турбины. ЦДЭ будет насыщен эксплуатационной информацией, а также данными, полученными и накопленными с помощью большого количества измерительных систем, которыми оснащен стенд. Сопоставление отклика от ЦДП и от ЦДЭ позволит выделить влияние различных факторов на достоверность данных, генерируемых ЦД. Кроме того, это должно позволить осознать состоятельность задачи создания ЦД реального турбоагрегата АЭС и выявить круг ключевых параметров, необходимых для создания корректного двойника.

В рамках работы по созданию ЦД мы не рассматриваем задачи моделирования нестационарных процессов в проточной части, вопросы моделирования динамики подшипников и многие другие. Процессы, которые должны моделироваться, – течение пара в проточной части и уплотнениях, тепловые процессы в элементах ротора и статора, изменение геометрии под воздействием этих и иных моделируемых процессов в стационарной постановке.

Используя оба подхода к созданию ЦД, мы надеемся получить опыт верификации и настройки ЦДП, а также отбора и обобщения эксплуатационных данных, составляющих основу ЦДЭ. В итоге наш прототип ЦД паровой экспериментальной турбины в области стационарных тепловых процессов позволит нам лучше планировать программу исследований, прогнозировать результаты, проводить верификацию предсказанных значений, а затем перейти к созданию ЦД энергетической паровой турбины.

Одновременно необходимы создание и расширение систем диагностики, использующих технологию ЦД, создание храни-

лищ данных с общим или лимитированным доступом к ним для обобщения и развития систем знаний (рис. 1).

НПО ЦКТИ участвует в развитии и иных методов, основанных на использовании численного моделирования. Например, это современные технологии 3D печати, называемые также аддитивными технологиями. Мы создаем модели для такой технологии, изучая существующие ограничения, которые накладываются технологией. По таким технологиям изготавливаются сложные изделия, в частности средства измерения потока – аэродинамические и оптические зонды, гребенки измерения давлений и температур.

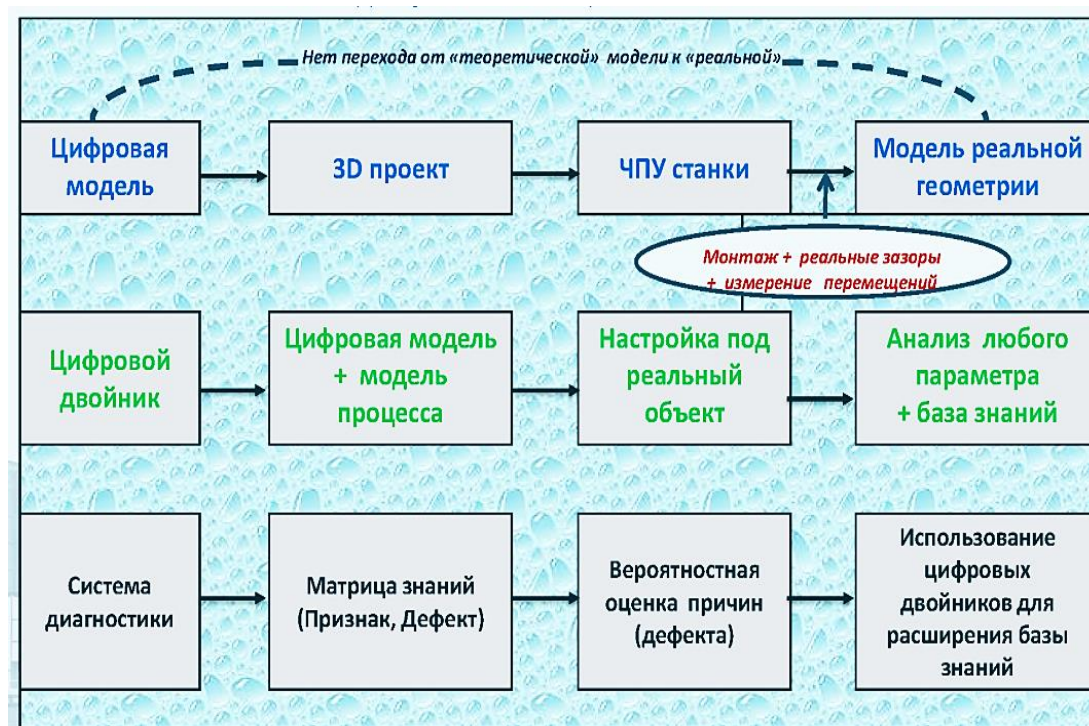


Рис. 1. Схема этапов создания системы знаний

Еще одним направлением развития современных систем является развитие технологий диагностики отказов на основе создания и использования базы знаний.

Примерами таких систем являются:

Система диагностики вибрационного состояния турбоагрегатов [5]

Разработана и широко внедрена система диагностики вибрационного состояния турбоагрегатов «ВИДАС» на базе использования базы знаний (рис. 2).

Функции системы:

- мониторинг вибрационных параметров, механических величин и режимных параметров;
- автоматическая диагностика вибрационного состояния на основе анализа вибрационных, тепломеханических и режимных параметров;
- работа в исследовательском режиме (анализ архивных данных, спектры, уровни, траектории, формы колебаний и т. д.);

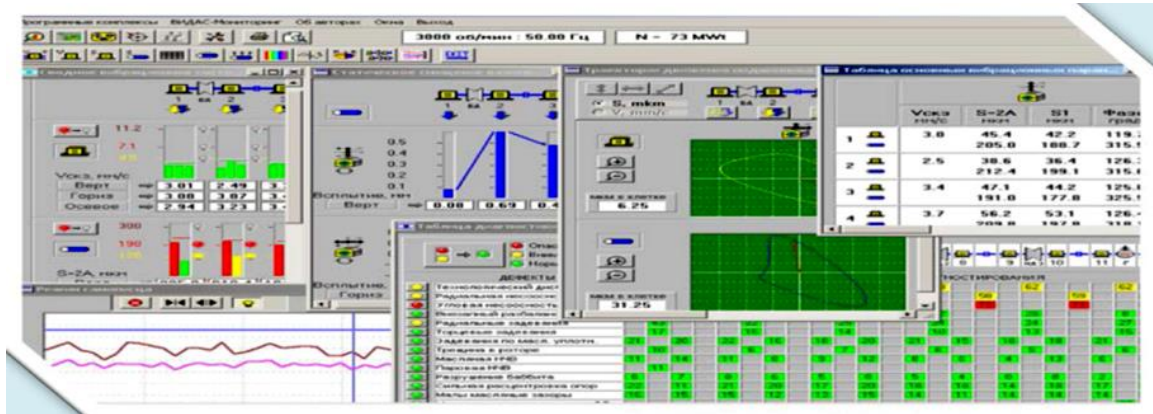


Рис. 2. Система вибродиагностики турбоагрегатов «ВИДАС»

– архивация данных о вибрационном состоянии турбоагрегата, тепломеханических, режимных параметров и результатов диагностики за весь период работы агрегата с возможностью их последующего представления и анализа;

– определение оптимальных вариантов расположения балансировочных грузов с использованием программы многоплоскостной динамической балансировки, входящей в комплект поставки системы «ВИДАС»;

– обеспечение «удаленного сервиса (инжиниринга)» при минимальных командированиях специалистов НПО ЦКТИ на объекты при максимальном охвате состава генерирующего оборудования. Для обеспечения полноценного удаленного сервиса контролируемого турбинного оборудования была разработана web-версия программного обеспечения системы вибродиагностики «ВИДАС».

Кроме перечисленных, возможно диагностирование и некоторых других дефек-

тов, присущих определенным классам турбомашин и конкретным турбоагрегатам.

Алгоритмическое наполнение системы вибрационной диагностики разработано на базе расчетно-теоретических, модельных и натурных исследований и опирается на богатый опыт специалистов НПО ЦКТИ, накопленный в процессе вибрационной наладки и эксплуатации паро- и газотурбинных агрегатов производства турбинных заводов Санкт-Петербурга, Харькова и Екатеринбурга, работающих во многих странах мира.

Система эксплуатационной диагностики механического состояния лопаточного аппарата со свободными концами лопаток – АСДЛ «СКАЛА» [5]

Назначение системы (рис. 3):

– непрерывный контроль механического состояния каждой лопатки ступени (нескольких ступеней) в процессе эксплуатации осевой турбомшины;

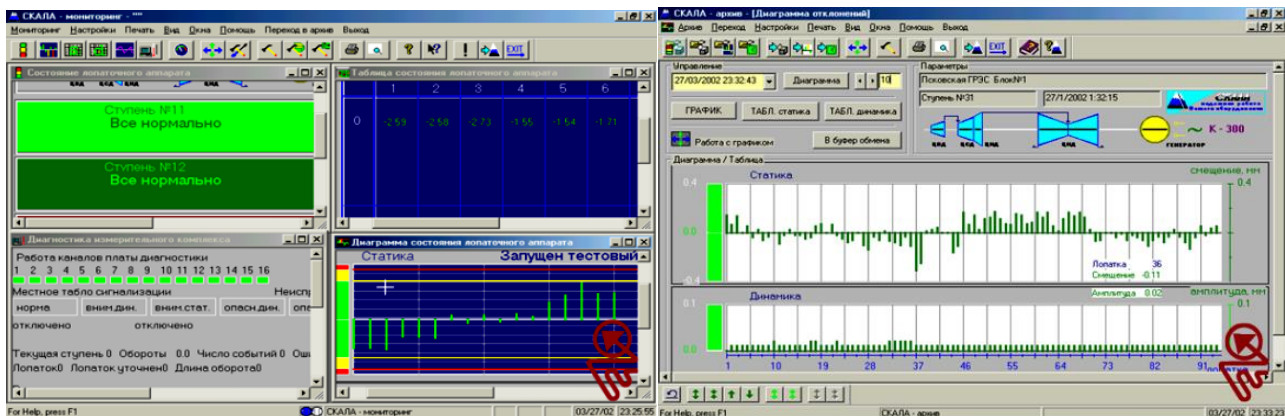


Рис. 3. Непрерывный контроль механического состояния каждой лопатки ступени

- своевременное выявление повреждений лопаточного аппарата;
- непрерывный контроль уровня вибрации каждой лопатки ступени (нескольких ступеней) в процессе эксплуатации осевой турбомашины;
- оперативное оповещение персонала блока об обнаруженном повреждении лопаточного аппарата с описанием повреждения и указанием соответствующего номера лопатки и номера ступени.

Информационно-диагностическая система турбоустановки ИДС «МЕНТОР» [6]

Предназначение системы «Ментор» (рис. 4):

- система работает непрерывно и в режиме реального времени рассчитывает и отображает текущие числовые значения величин термонапряжений и границы их допустимых изменений для контрольных критических участков или сечений термонапряженных деталей (ротора, клапана, корпуса);
- для каждого цикла «нагрузка – разгрузка» выполняется оценка повреждаемости (снижения ресурса) каждого элемента нарастающим итогом в процентном отношении к полному назначенному сроку службы;
- осуществляется расчет и оценка КПД цилиндров высокого и среднего давления.

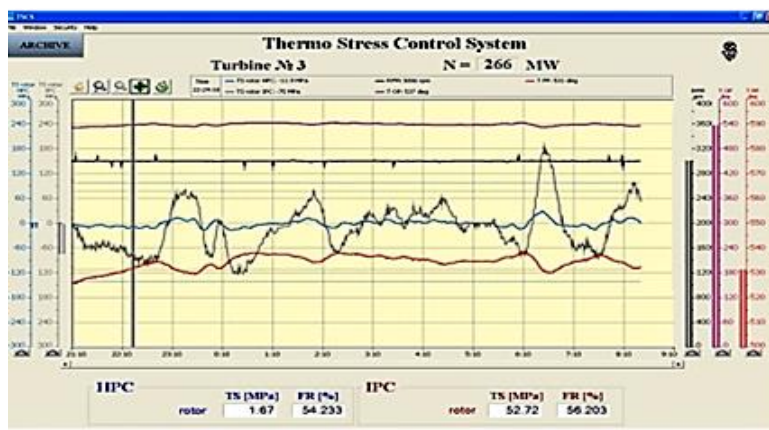


Рис. 4. Отображение уровня термического напряжения

- Система предоставляет возможность:
- анализировать зависимости КПД от мощности турбины и расходов пара;
 - прогнозировать объем ремонтных работ;
 - оценить качество типового ремонта или модернизации проточной части и уплотнений;
 - диагностировать состояние лопаточного аппарата по степени шероховатости, абразивному износу и повреждениям.

Система эксплуатационного контроля электромагнитного состояния турбинного оборудования [7, 8]

Система (рис. 5) предназначена для непрерывной эксплуатационной диагностики электромагнитного состояния турбоагрегата и своевременного выявления:

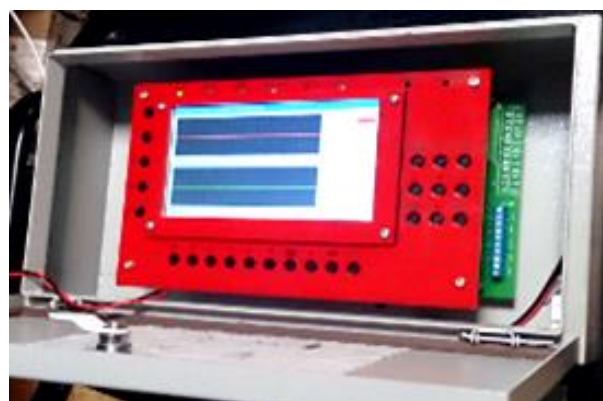


Рис. 5. Внешний вид контроллера электромагнитного состояния

- ненадлежащей работы токосъемного устройства;
- недопустимо низкого сопротивления подступовой изоляции изолированных подшипников;

- недопустимо низкого сопротивления изоляции масляных пленок;

- появления контуров замыкания роторных токов.

Автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния гидроагрегатов [9]

НПО ЦКТИ осуществляет создание и внедрение автоматизированных систем мониторинга и диагностики технического состояния гидроагрегатов (рис. 6), включая:

- разработку технических требований на стационарную систему с учетом особенностей конструкции оборудования;

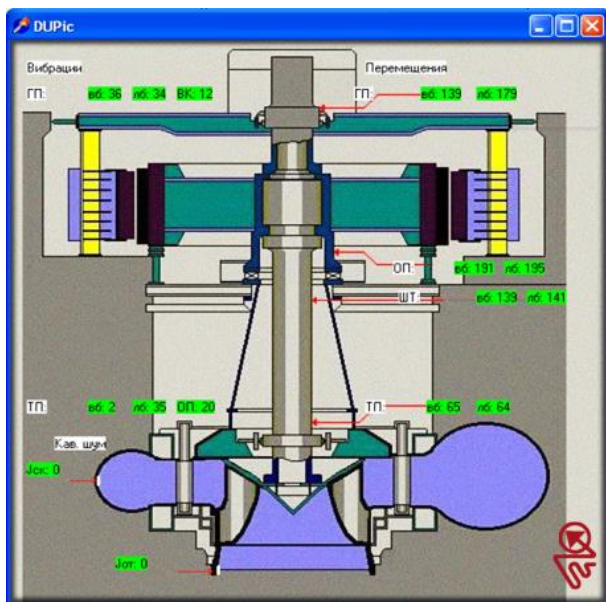


Рис. 6. Система виброконтроля гидроагрегата Круонисской ГАЭС (Литва)

- разработку алгоритмов и программного обеспечения системы диагностирования технического состояния оборудования и обнаружения неисправностей на ранней стадии их зарождения;

- сопровождение ввода системы в эксплуатацию;

- проведение верификации системы с выдачей заключения о ее соответствии заданным техническим требованиям.

Внедрение перечисленных выше диагностических систем на действующих АЭС, ТЭС и ГЭС позволило повысить надежность и безопасность эксплуатации основного и вспомогательного оборудования

электростанций, своевременно выявлять опасные повреждения узлов и деталей турбоагрегатов, проводить оценку качества ремонтных работ.

К несомненным достоинствам этих систем следует отнести и тот факт, что вся цепочка работ, начиная от создания алгоритмов диагностики и заканчивая внедрением программно-технических средств на турбинном оборудовании, выполнена специалистами НПО ЦКТИ.

Дальнейшее развитие этих систем видится на базе симбиоза экспертных систем и систем с использованием технологий ЦД.

С учетом особенностей современного этапа развития общества можно констатировать, что устойчивость развития и надежность работы энергетического оборудования, минимизация влияния на окружающую среду – основные вызовы, стоящие перед нами на ближайшее будущее.

В этой связи НПО ЦКТИ как ведущий инженерный центр в области энергооборудования строит свою техническую политику с учетом таких направлений развития как:

- совершенствование и расширение стендовой базы, снижение неопределенности результатов для верификации расчетных моделей и создания базы данных для их обобщения и дальнейшего использования;

- создание цифровых двойников оборудования в области стационарных режимов;

- расширение области моделирования с включением нестационарных процессов на базе модельных исследований на стендах;

- создание цифровых моделей оборудования и процессов;

- создание и расширение систем диагностики, включая элементы предиктивной диагностики;

- создание хранилищ данных с общим или лимитированным доступом к ним для обобщения и развития систем знаний.

Тем самым современный цифровой тренд отраслевого инжиниринга направлен на обеспечение устойчивого развития энергетики и энергомашиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации [Электронный ресурс]. События. Статья. Операторы мер поддержки «сквозных» цифровых технологий подвели итоги конкурсных отборов. 20.01.2020. URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/39614/> (дата обращения: 31.01.2021).

2. Сайт Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации [Электронный ресурс]. События. Статья. Минцифры России выделяет 7.1 млрд рублей на гранты для ИТ-проектов. 22.09.2020. URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/40094/> (дата обращения: 31.01.2021).

3. **Массель Л.В.** Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам / Л.В. Массель, А.Г. Массель, А.Н. Копайгородский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 5-19.

4. Эксплуатационная диагностика

теплового состояния и экономичности паровых турбин ТЭС и АЭС / В.В. Божко, А.Н. Коваленко, В.М. Ляпунов, Л.А. Хоменок // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 45-50.

5. Развитие и совершенствование систем эксплуатационной диагностики производства ОАО «НПО ЦКТИ» для турбоагрегатов ТЭС и АЭС / И.А. Ковалев, В.Г. Раковский, Н.Ю. Исаков, А.В. Сандовский // Теплоэнергетика. 2016. № 3. С. 15-20.

6. **Коц В.Д.** Электроэрозионные повреждения элементов паровых турбин и способы их предотвращения / В.Д. Коц, Л.З. Хаин // Тр. ЦКТИ. 2001. Вып. 283. С. 198-202.

7. Обзор источников и анализ причин электроэрозионных повреждений турбоагрегатов / А.В. Бакаев, Н.Ю. Исаков, А.В. Сандовский, А.Н. Сергель // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. № 3. С. 206-210.

8. **Иванченко И.П.** Анализ систем мониторинга и диагностики технического состояния гидротурбин / И.П. Иванченко, А.Н. Прокопенко // Гидротехника. 2011. № 2. С. 74-80.

Михайлов Владимир Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, генеральный директор Открытого акционерного общества «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

Vladimir Ye. Mikhailov – Dr. Sc., Professor, Director General of JSC I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (JSC «NPO CKTI»).

Статья поступила в редакцию 05.03.2021, принята к опубликованию 24.03.2021

УДК 621.316

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО АДАПТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

**С.А. Данилов, А.И. Коваленко, А.А. Волошин,
Е.А. Волошин, В. С. Сазанов**

A SYSTEM OF AUTOMATIC ADAPTIVE CHANGING OF RELAY PROTECTION OPERATION PARAMETERS IN DISTRIBUTION NETWORKS

**S.A. Danilov, A.I. Kovalenko, A.A. Voloshin,
E.A. Voloshin, V.S. Sazanov**

В существующих реалиях интеграция объектов распределенной генерации в распределительные сети приводит к появлению комплекса проблем, связанных с реализацией релейной защиты. Так, при интеграции распределенной генерации в энергосистему на уровне распределительной сети становится возможной многосторонняя подпитка точки КЗ, появляются новые аварийные режимы и электромеханические переходные процессы, которые могут привести к излишнему или ложному срабатыванию релейной защиты (РЗ). Таким образом, возникает задача разработки системы, способной автоматически адаптировать параметры срабатывания релейной защиты при изменении режимов сети, а также при вводе новых объектов распределенной генерации в распределительную сеть. Данная система позволит уменьшить трудозатраты на анализ и расчет параметров срабатывания релейной защиты, а также уменьшить количество ошибок, связанных с человеческим фактором. В данной работе предлагаются математические и логические методы, реализованные как программы на ЭВМ, для расчета параметров срабатывания устройств релейной защиты. Результатами работы системы являются алгоритмы и программные модули, позволяющие произвести автома-

Currently, integration of distributed generation objects into distribution networks leads to a range of problems associated with relay protection. Therefore, when integrating distributed generation into the power system at the level of a distribution network, a multi-recharge of the short-circuit point becomes possible, novel emergency modes and electromechanical transients appear, which can lead to excessive or false triggering of relay protection. Thus, there is a problem associated with developing a system that can automatically adapt the parameters of relay protection operation when changing the network modes, as well as when introducing new distributed generation objects into a distribution network. This system will allow for a reduction in the labor costs required for the analysis and calculation of operation parameters of relay protection, and also reduce the number of errors connected with the human factor. In this paper, we propose mathematical and logical methods, implemented as computer programs, for calculating the response parameters of relay protection devices. The results of the system operation are algorithms and software modules that allow automatic calculation of response parameters of relay protection devices that implement the functions of a three-stage protection (instantaneous overcurrent

тический расчет параметров срабатывания устройств релейной защиты, реализующих функции трехступенчатых защит (токовая отсечка без выдержки времени, токовая отсечка с выдержкой времени и максимальная токовая защита), распределительной сети радиального типа. Под параметрами срабатывания понимаются уставки срабатывания по току и по времени.

Ключевые слова: *релейная защита; CIM; автоматический расчет уставок; микросервисы; база данных*

Введение

В настоящее время наибольшее распространение в возобновляемой энергетике получили ветроэлектрические установки (ВЭУ) – 10 % – и солнечные электростанции – 5 % [1]. Интеграция объектов распределенной генерации (РГ) в распределительные сети приводит к появлению комплекса проблем, связанных с реализацией релейной защиты (РЗ) [2-7]. Так, при интеграции РГ в электроэнергетическую сеть на уровне распределительной сети становится возможной многосторонняя подпитка точки КЗ, появляются новые, ранее отсутствующие (в связи с электрической удаленностью генерирующих установок (ГУ) от места повреждения) аварийные режимы и электро-механические переходные процессы.

Появляющиеся в связи с эти проблемы в части реализации релейной защиты таких распределительных сетей и способы их решения неоднократно поднимались и обсуждались как российскими учеными, так и в зарубежном научном сообществе. В статьях [8-10] авторы рассматривают особенности реализации ступенчатых защит с относительной селективностью для активных распределительных сетей и приходят к выводу, что традиционное исполнение максимальной токовой защиты (МТЗ) и дистанционной защиты (ДЗ) не позволяют полноценно применять эти защиты. В ряде случаев со «слабым» источником генерации чувствительность МТЗ может снижаться до 1,7 раза, а зона действия («видимое» сопротивление) резервной ступени ДЗ может увеличиваться до 2 раз.

protection, time delayed overcurrent protection, and maximum current protection), and a radial type distribution network. The current and time operation settings refer to the actuation data.

Keywords: *relay protection, CIM, automatic setting calculation, micro-services, data base*

Возобновляемые источники энергии носят прерывистый характер. В работах зарубежных авторов [11-15] предлагается использование дифференциальных защит и адаптивных резервных защит. Для реализации защиты распределительной сети с ВИЭ в работе [14] предложена динамическая схема адаптивной защиты, которая представляет собой два этапа: офлайн и онлайн. В режиме офлайн определяются возможные топологии сети, которые включают активное управление сетью (отключение линии и отключение генератора) и оптимизируют настройки РЗ с помощью алгоритма дифференциального поиска и метода нелинейной оптимизации, который затем сохраняется в групповом порядке. На этапе онлайн адаптивный метод на основе нечеткой логики идентифицирует группу топологии сети и сообщает соответствующие параметры срабатывания отдельным устройствам защиты.

Похожий подход к реализации адаптивной защиты был представлен в [15]. В работе [11] приведены материалы, иллюстрирующие возможные варианты выполнения адаптивной защиты с относительной селективностью. Первая группа решений отчета [11] для обеспечения адаптивности использует различного рода блокировки смежных защит, а вторая группа технических решений предполагает автоматическое изменение параметров срабатывания устройств РЗА в процессе эксплуатации сети. На взгляд авторов данной статьи, второй подход является наиболее перспективным решением и может иметь в будущем более широкое применение. При этом стоит от-

метить, что автоматическая корректировка параметров срабатывания также может быть реализована различными способами; например, в той же уже вышеупомянутой работе группы зарубежных авторов [11] описываются примеры реализации комплексов автоматического расчета и корректировки параметров срабатывания устройств релейной защиты двух типов:

– первый тип программно-технических комплексов (ПТК) осуществляет офлайн расчет режимов работы сети и параметров срабатывания устройств релейной защиты, после чего составляется матрица переключений уставок, и в процессе эксплуатации ПТК переключает ранее рассчитанные уставки в соответствии с матрицей переключений;

– второй тип ПТК осуществляют расчет режимов, расчет и изменение параметров срабатывания устройств релейной защиты в режиме реального времени.

Приведенные материалы и разработки относились к низковольтным сетям, где используются преимущественно максимальные токовые защиты, реализованные в автоматических выключателях, а также в отдельно стоящих устройствах защиты. Для сетей же среднего класса напряжения 6-35 кВ расчет защит может осложняться использованием более сложных устройств релейной защиты и большей вариативностью схемно-режимных ситуаций. Тем не менее авторы представленной работы рассматривают для разработки именно второй тип ПТК для автоматического расчета и изменения параметров срабатывания устройств РЗ распределительной сети.

Помимо того, что в сети среднего класса напряжения и питающей подстанции состав защит будет отличаться от тех, что используются в сети 0,4 кВ, также возникает ряд дополнительных задач, требующих решения:

– уставки одних и тех же защит различных производителей могут отличаться семантикой и в ряде случаев качественно и количественно (особенно актуально для дифференциальных защит);

– помимо расчета, может потребоваться координация изменения уставок в устройствах защиты;

– для сокращения времени на расчеты режимов и уставок требуется ограничивать зону рассматриваемой сети, формируя для внешней электрической сети эквиваленты с актуализацией их параметров в режиме реального времени.

Существуют отечественные решения [16, 17], которые позволяют на основе большого количества входных данных проводить полный автоматизированный анализ действия защит сети с высокой скоростью расчёта и информативностью получаемых результатов, имеющих некоторую форму представления для последующей работы с ними.

В настоящей работе рассматривается разработка микросервисного программно-го комплекса на сервис расчета и координации изменения уставок релейной защиты и прототипа программного модуля расчета уставок устройств релейной защиты. Данные разработки позволяют осуществлять автоматический расчет уставок РЗ в энергосистеме, выраженной в формате CIM модели.

Основной состав микросервисной архитектуры

Сервис расчета и координации уставок основывается на работе нескольких отдельных сервисов, написанных на языке программирования Java, которые последовательно реализуют логические операции, необходимые для расчета и координации уставок.

Микросервисная архитектура для автоматического расчета уставок состоит из нескольких модулей (сервисов):

1. Центральный сервис расчета и координации изменения уставок (РКУ) – сервис, осуществляющий последовательный запуск сервисов генерации сценариев, сервиса расчета режимов, сервиса кластеризации, а также модуля запуска скриптов АРПС, который находится в составе центрального сервиса РКУ.

2. Сервис генерации сценариев – сервис, осуществляющий разработку нескольких вариантов схемы для дальнейшего определения максимального и минимального режимов.

3. Сервис расчета режимов – сервис, осуществляющий расчет токов в ветвях и напряжений в узлах схемы для нормального и аварийного режимов.

4. Сервис кластеризации – сервис, определяющий последовательность расчета защит.

5. Модуль запуска скриптов – модуль, осуществляющий запуск скриптов для расчета уставок РЗ и загрузки результатов в базу данных (БД).

Структурная схема микросервисной архитектуры представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема микросервисной архитектуры

Центральный сервис РКУ

Центральный сервис РКУ разрабатывается в рамках реализации микросервисной архитектуры разработки комплекса защит, адаптивных к изменению состава оборудования и режимов работы сети, а также автоматизации проектирования комплекса технических средств систем электроснабжения крупных и средних потребителей с учётом минимизации капитальных и операционных затрат при обеспечении заданных показателей надежности электроснабжения потребителей. Адаптивность защит распределительной сети должна реализовываться путем автоматической корректировки параметров срабатывания в соответствии с текущим режимом работы.

На вход центрального сервиса РКУ поступает запрос для расчета уставок. Внутри запроса указан идентификатор схемы

projectID. Этот идентификатор сервис поочередно отправляет в сервис генерации сценариев для генерации сценариев аварийных и нормальных режимов, в сервис расчета режимов для расчета сгенерированных сценариев, в сервис кластеризации для определения последовательности расчета защит в схеме и привязки к защитами терминалов (в семантике СИМ под терминалом понимается ветвь электрооборудования, соединяющаяся с узлом схемы) для загрузки токов, протекающих через них, и затем в находящийся внутри сервиса РКУ модуль запуска скриптов для расчета уставок и загрузки результатов в БД. После того как модуль запуска скриптов загрузил все результаты, центральный сервис РКУ заканчивает свою работу.

В дальнейшем предполагается разработать отдельный сервис, который позволит

осуществлять адаптивные изменения параметров срабатывания устройств релейной защиты.

Сервис кластеризации

Сервис кластеризации служит для предварительной обработки данных, необходимых для расчета уставок защит. Под предварительной обработкой данных понимается следующая систематизация: определение смежных защит на схеме, выстраивание сквозной нумерации защит по очередности

их расчета, а также определение точек повреждений и участков сети, в которых будут сниматься значения токов и напряжений для расчета параметров срабатывания защит.

Каждый кластер представляет собой совокупность оборудования, которая располагается между двумя шинами.

В качестве тестовой модели выбрана схема IEEE 14 без замкнутых контуров. Данная схема смоделирована в программном обеспечении RastrWin3 (см. рис. 2).

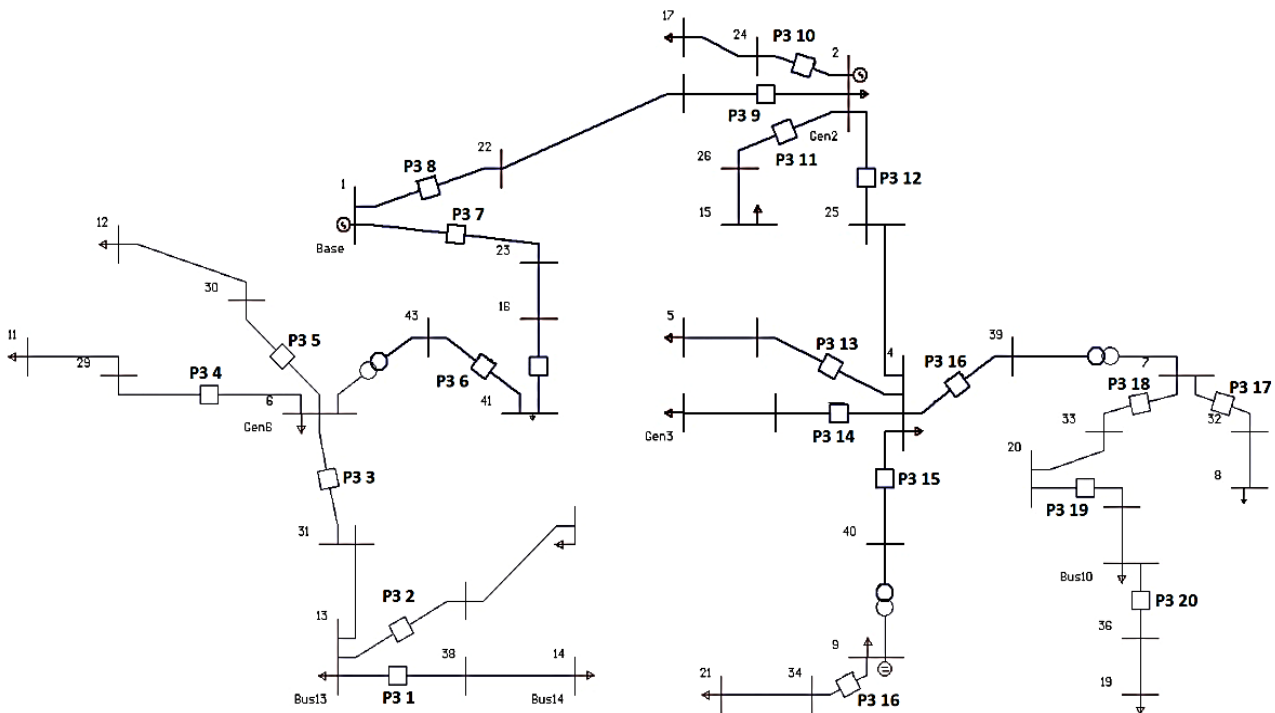


Рис. 2. Схема IEEE 14 без замкнутых контуров в RastrWin3

Ветвь графа сети, находящаяся между узлами 1 и 2 (см. рис. 2), имеет двустороннее питание и, несмотря на то, что рассматривается одна ветвь, выделяются 2 кластера с противоположными направлениями 1-2 и 2-1. В соответствии с целью минимизации количества кластеров принято решение о внедрении дополнительного условия создания кластера – наличие выключателя в качестве первого объекта кластера.

В целях наилучшего качества отстройки защит друг от друга и выполнения условия селективности защит принято решение о сквозной нумерации защит путем последовательного прохода по графу от каждой

из точек питания и установки параметра веса каждому кластеру. Очередность расчета защит должна идти от большего веса к меньшему и справедливо для всех защит, являющихся резервными вне зависимости от типа повреждения, на которое реагирует защита.

Модуль запуска скриптов

На вход модуля запуска скриптов поступает запрос от центрального сервиса РКУ для расчета уставок. Внутри запроса указан идентификатор схемы *projectID*. По этому идентификатору модуль запуска скриптов загружает схему, соответствующую

щую данному *projectID*. Через БД загружаются защиты из этой схемы и, согласно их номеру в последовательности расчета, выставленному в сервисе кластеризации, поочередно поступают на расчет уставок.

Каждая защита в БД имеет название производителя и тип защиты. В зависимости от этих значений через БД загружается определенный скрипт и сохраняется в локальной директории. Скрипт представляет собой файл с расширением .ру, в котором на языке программирования Python расписан расчет ступеней защиты, включая расчет тока срабатывания защиты, коэффициента чувствительности и времени срабатывания защиты, а также необходимые параметры для расчетов.

После того как файл скрипта был сохранен в локальной директории, из файла считывается список параметров (максимальный нагрузочный ток, ток срабатывания смеж-

ной защиты и т. д.), необходимых для расчета, причем названия параметров соответствуют названиям параметров из БД. После этого из терминалов, которые связаны с защитой, через БД находятся соответствующие значения параметров и сохраняются в отдельном файле в формате JSON, который затем считывается скриптом. В зависимости от полноты предоставленных скрипту данных, для защиты рассчитываются определенное количество ступеней. После расчета скрипт сохраняет результаты в выходной файл в локальной директории. Модуль запуска скриптов считывает выходной файл и записывает результаты в БД для рассчитываемой защиты.

После того как все защиты оказались рассчитаны, модуль запуска скриптов заканчивает свою работу.

Описанный алгоритм работы модуля запуска скриптов представлен на рис. 3.

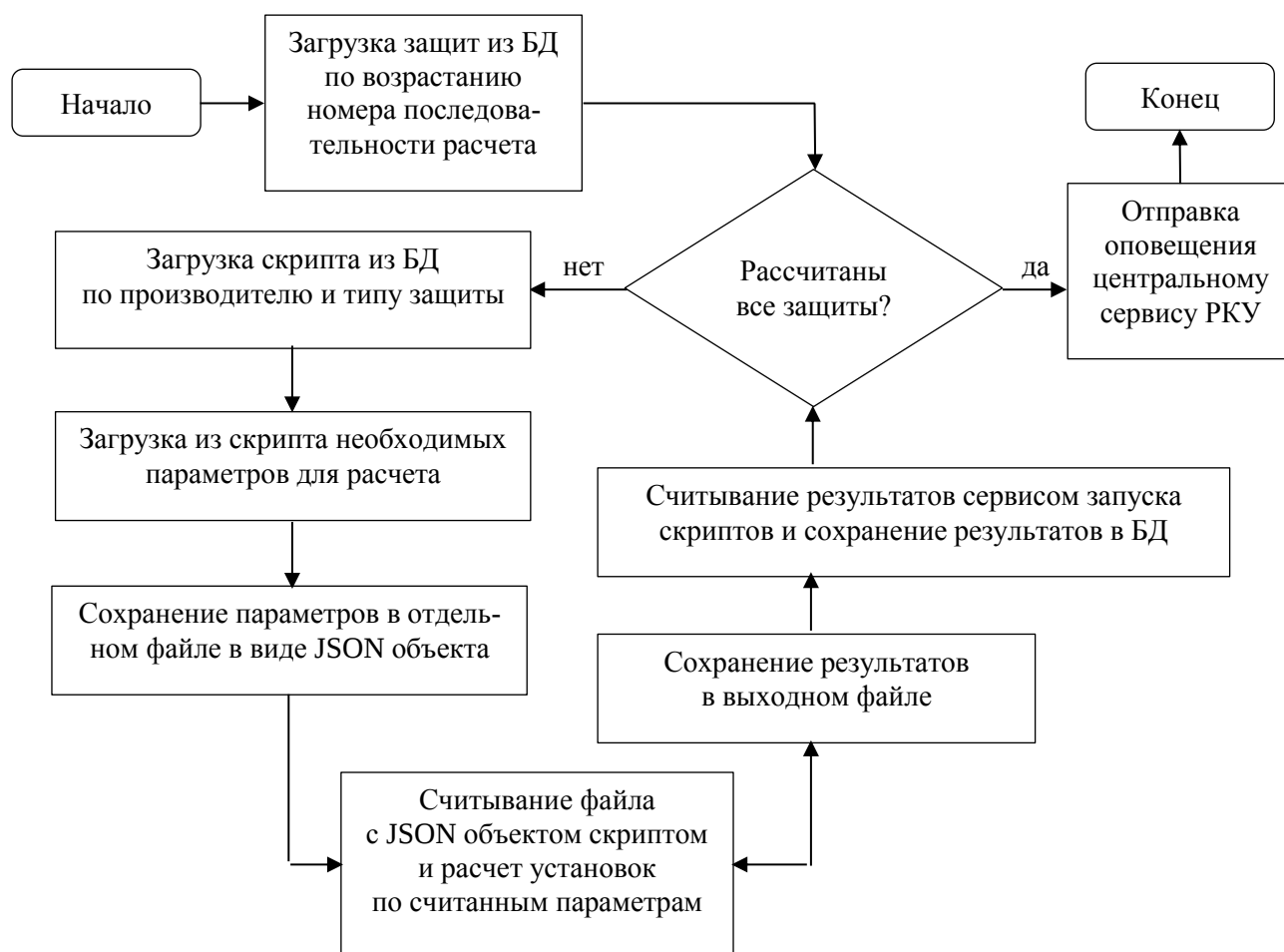


Рис. 3. Общая схема алгоритма работы модуля запуска скриптов АРПС

Работа сервиса РКУ при расчете уставок

В тестовой схеме (см. рис. 2) имеются 17 ветвей линий электропередач (ЛЭП), 3 ветви двухобмоточных трансформатора и 21 ветвь с выключателем. В 11 узлах расположены нагрузки активной и реактивной мощности, в 2 узлах – генерация активной и реактивной мощности, в 3 узлах – генерация только реактивной мощности. Каждая ветвь, не содержащая выключателя, а также генераторы в генерирующих узлах обладают сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательности; кроме этого, ветви с двухобмоточными трансформаторами обладают коэффициентом трансформации.

В RastrWin3 узлы и ветви представлены в виде одноименных таблиц, каждая из которых экспортируется отдельным файлом формата csv. По экспортируемым файлам специальным программным обеспечением генерируется файл формата XML, содержащий объекты исходной схемы в семантике CIM. В данном файле прописываются объекты релейной защиты с привязкой к выключателям согласно рис. 2. Помимо защит в файле прописываются трансформаторы тока с привязкой к своей защите.

Для расчета трехступенчатых токовых защит на вход центрального сервиса РКУ через БД поочередно подавались объекты защит согласно номеру последовательности их расчета. По производителю и наименованию терминала защиты из БД загружался скрипт. Из скрипта в сервис РКУ загружались наименования параметров, которые участвуют в расчетах ступеней защит. По выгруженным параметрам сервис РКУ через БД находит одноименные значения токов, которые были рассчитаны и привязаны к терминалам в сервисе расчета режимов, а терминалы, по которым нужно находить значения токов, привязаны к рассчитываемой защите в результате работы сервиса кластеризации. Так как, согласно методике, расчет

защит происходит с фазными значениями токов, а в БД хранятся значения токов в симметричных составляющих, в сервисе РКУ происходит преобразование симметричных составляющих в фазные величины токов. Также если в загруженных наименованиях имеется коэффициент токораспределения, то сервис РКУ производит расчет данного коэффициента по значениям токов через соответствующие терминалы, которые привязаны к рассчитываемой защите в результате работы сервиса кластеризации. После того как найдены и рассчитаны все параметры, входные данные обворачиваются в JSON объект и отправляются в скрипт для расчета параметров срабатывания и коэффициентов чувствительности. По окончании работы скрипта сервисом РКУ считывается выходной файл с результатами работы скрипта, которые заносятся в БД.

Результаты и обсуждения

Для проверки правильности рассчитанных уставок микросервисной архитектурой, была разработана модель тестовой сети в программном комплексе PSCAD (см. рис. 4).

Моделировались ступени защит, расположенных в трех участках сети (выключатели BRK6_31, BRK13_37, BRK13_38). Для проверки работы защит производилась проверка рассчитанных уставок защит по их реакции на КЗ в шести точках (см. рис. 4): К₁, К₂, К₃, К₄, К₅, К₆.

В таблице представлены результаты действия защит на КЗ в различных точках сети с введенными уставками, рассчитанными микросервисной архитектурой.

По результатам моделирования трехступенчатых защит с рассчитанными микросервисной архитектурой уставками в программном комплексе PSCAD можно судить о том, что соблюдаются требования, предъявляемые к релейной защите: селективность и чувствительность.

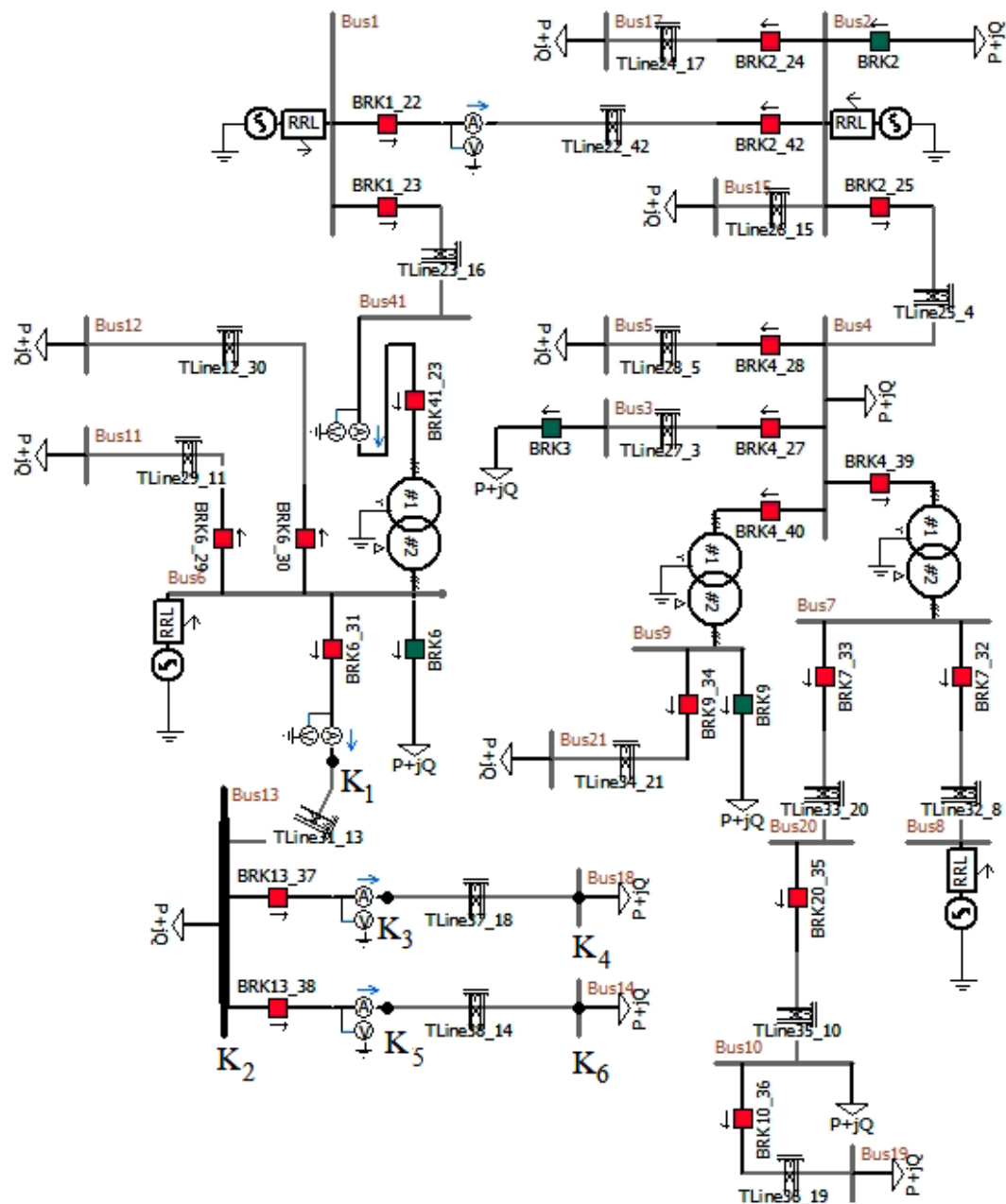


Рис. 4. Схема IEEE 14 без замкнутых контуров в PSCAD

Результаты действия защит

Точка повреждения	Тип повреждения	Защита 1 (BRK6_31)			Защита 2 (BRK13_37)			Защита 3 (BRK13_38)		
		I ступень	II ступень	III ступень	I ступень	II ступень	III ступень	I ступень	II ступень	III ступень
K ₁	Двухфазное КЗ	сработала	пустилась	пустилась	—	—	—	—	—	—
	Трехфазное КЗ	сработала	пустилась	пустилась	—	—	—	—	—	—
K ₂	Двухфазное КЗ	—	сработала	пустилась	—	—	—	—	—	—

Окончание таблицы

Точка повреждения	Тип повреждения	Защита 1 (BRK6_31)			Защита 2 (BRK13_37)			Защита 3 (BRK13_38)		
		I ступень	II ступень	III ступень	I ступень	II ступень	III ступень	I ступень	II ступень	III ступень
	Трехфазное КЗ	—	сработала	пустилась	—	—	—	—	—	—
	Двухфазное КЗ	—	пустилась	пустилась	сработала	пустилась	пустилась	—	—	—
K ₃	Трехфазное КЗ	—	пустилась	пустилась	сработала	пустилась	пустилась	—	—	—
	Двухфазное КЗ	—	—	пустилась	—	сработала	пустилась	—	—	—
K ₄	Трехфазное КЗ	—	—	пустилась	—	сработала	пустилась	—	—	—
	Двухфазное КЗ	—	пустилась	пустилась	—	—	—	сработала	пустилась	пустилась
K ₅	Трехфазное КЗ	—	пустилась	пустилась	—	—	—	сработала	пустилась	пустилась
	Двухфазное КЗ	—	—	пустилась	—	—	—	—	сработала	пустилась
K ₆	Трехфазное КЗ	—	—	пустилась	—	—	—	—	сработала	пустилась

Заключение

Создание комплекса адаптивной релейной защиты с автоматическим расчетом и корректировкой параметров срабатывания РЗА в соответствии с текущим режимом работы сети является одним из вариантов решения проблем, связанных с релейной защитой при интеграции в распределительную сеть генерирующих установок, что подтверждается работами зарубежных авторов по данной теме.

Использование микросервисной архитектуры позволит использовать функционал в следующих режимах: персональный компьютер автоматического расчета параметров срабатывания релейной защиты оператором в режиме офлайн; микросервисная архитектура, устанавливаемая на

объекте, для автоматического расчета и изменения параметров срабатывания релейной защиты в режиме онлайн.

Благодарности. Исследование выполнено на средства гранта на государственную поддержку центра Национальной технологической инициативы «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем», созданного на базе ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Acknowledgments. The study was funded by a grant for state support of the NTI Competence Centre for the «end-to-end» technology “Technologies for Electricity Transportation and Distributed Intelligent Energy Systems”, created on the basis of the MPEI.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по возобновляемой энергетике Европейского союза // Аналитические обзоры Института Энергетики / Институт энергетики НИУ ВШЭ, 2016.

2. Илюшин П.В. Изменение технических требований к системам РЗА в условиях формирования интеллектуальных микроненергосистем с распределенными энергетическими ресурсами, включая ВИЭ /

П.В. Илюшин // Заседание секции «Релейная защита и автоматика» Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС», подкомитета В5 от 29.10.2019. АО «СО ЕЭС». М., С.19; 45.

3. Embedded Generation / N. Jenkins, R. Allan, P. Grossley, D. Kirschen, G. Strbac. London: IEE, 2000. 273 p.

4. **Воропай Н.И.** Требования к противоаварийному управлению ЭЭС с учетом изменения условия их развития и функционирования / Н.И. Воропай, Д.Н. Ефимов // Надежность либерализованных систем энергетики. Новосибирск: Наука, 2004. С. 74-84.

5. **Фишман В.П.** Построение систем РЗА при наличии собственных источников электроэнергии у потребителей / В.П. Фишман // Новости электротехники. 2002. № 6 (18). С. 34-37.

6. **Funabashi T.** Study on Protection and Control of Dispersed Generation / T. Funabashi // 2001 IEEE PES Summer Meeting. Vancouver, Canada, July 15-19, 2001. P. 131-133.

7. **Онисова О.А.** Характеристика влияния распределенной генерации на функционирование релейной защиты и автоматики / О.А. Онисова // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 5 (50). С. 88-93.

8. **Онисова О.А.** Особенности функционирования направленных максимальных токовых защит в электрических сетях с распределенной генерацией / О.А. Онисова // Энергетик. 2015. № 1. С. 17-21.

9. Максимальная токовая защита в системах электроснабжения с распределенной генерацией / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, Г.С. Нудельман, О.А. Онисова // Известия вузов. Электромеханика. 2013. № 1. С. 75-78.

10. **Онисова О.А.** Направления развития релейной защиты электроэнергетических систем с малыми распределенными электростанциями / О.А. Онисова // Релейщик. 2014. № 4. С. 20-25.

11. Advanced Architectures and Control Concepts for MORE MICROGRIDS / DC2: Novel protection systems for microgrids // WORK PACKAGE C Alternative Designs for Microgrids. Contract No: SES6-019864.

12. Multilayered Protection Strategy for Developing Community Microgrids in Village Distribution Systems / C. Yuan, K. Lai, M.S. Illindala, M.A. Haj-ahmed, A.S. Khalsa // IEEE Transactions on Power Delivery 32(1):495-503/ DOI:10.1109/TPWRD.2016.2544923. January 2017.

13. **Zarei S.F.** A Comprehensive Digital Protection Scheme for Low Voltage Microgrids with Inverter-based and Conventional Distributed Generations / S. Fariborz Zarei, M. Pamiani // IEEE Transactions on Power Delivery 32(1):1-1/ DOI:10.1109/TPWRD.2016.2566264 January 2016.

14. **Han Y.** Study of adaptive fault current algorithm for microgrid dominated by inverter based distributed generators / Y. Han, X.H. Hu, D.X. Zhang // Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, China, Jun. 16-18, 2010. P. 852-854.

15. **Singh M.** Adaptive protection coordination scheme for power networks under penetration of distributed energy resources / M. Singh, T. Vishnuvardhan, S.G. Srivani // IET Generation, Transmission & Distribution. Nov. 2016. Vol. 10. № 15. P. 3919-3929.

16. Автоматизированный расчет уставок устройств релейной защиты и определение минимального состава генерирующего оборудования в ПВК «АРУ РЗА» / С.А. Абакумов, А.В. Виштибеев, С.Е. Гаязов и др. // Известия НТИ Единой энергетической системы 2020. № 2 (83) С. 104-113.

17. **Анисимова О.** Автоматизация расчета параметров срабатывания релейной защиты / О. Анисимова, В. Ефремов // Энергетика и промышленность России. 2011. № 22 (186). С. 49.

Данилов Сергей Андреевич – инженер центра НТИ «НИУ «МЭИ», Москва

Sergej A. Danilov – MPEI, Moscow, Russia

Коваленко Александр Игоревич – старший преподаватель, ведущий инженер центра НТИ «НИУ «МЭИ», Москва

Aleksandr I. Kovalenko – MPEI, Moscow, Russia

Волошин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, директор центра НТИ «НИУ «МЭИ», Москва

Aleksandr A. Voloshin – MPEI, Moscow, Russia

Волошин Евгений Александрович – старший преподаватель, начальник отдела научных исследований НТИ «НИУ «МЭИ», Москва

Evgenij A. Voloshin – MPEI, Moscow, Russia

Сазанов Виталий Семенович – инженер центра НТИ «НИУ «МЭИ», Москва

Vitalij S. Sazanov – MPEI, Moscow, Russia

Статья поступила в редакцию 29.01.2021, принята к опубликованию 14.02.2021

УДК 621.314.58

РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ И ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ МАГНИТНОСВЯЗАННЫХ ОБМОТОК

П.А. Кошелев, Ю.И. Блинов, К.Ю. Блинов

CALCULATION OF THE COUPLING AND MUTUAL INDUCTANCE COEFFICIENT FOR MAGNETICALLY COUPLED WINDINGS

P.A. Koshelev, K.Yu. Blinov, Yu.I. Blinov

При анализе и моделировании электро-технических устройств, содержащих элементы с индуктивными связями, используются коэффициенты взаимной индуктивности M , которые зависят от коэффициента связи K_s между обмотками. Встречающееся в литературе допущение: $K_s = 1$ может внести заметную погрешность в расчеты, особенно при значениях K_s , существенно отличающихся от 1. Решение этой проблемы сводится к вычислению K_s и M для конкретной конструкции трансформатора и требует привлечения математических методов и программ.

В работе предлагается методика, основанная на сравнении переходных характеристик Г-образной и П-образной (естественной) схем замещения элемента с индуктивными связями и фиксации точки их совпадения. Полученные результаты позволяют повысить эффективность проектирования электромагнитного изделия и точность реализации проекта электро-технического и электротехнологического оборудования.

Ключевые слова: взаимная индуктивность, коэффициент связи, переходная характеристика

Общие положения

Электротехнологические установки обычно содержат элементы с индуктивными связями, а именно трансформаторы.

В расчётах этих элементов используются следующие параметры:

Mutual inductance coefficients M are used for the analysis and modeling of electrical devices containing inductance coupling elements, which depend on the coupling coefficient K_s between the windings.

The assumption found in the literature that $K_s = 1$, can lead to noticeable errors in the calculations, especially when the K_s values are significantly different from 1.

The problem can be solved by calculating K_s and M for a specific transformer design, which requires the use of mathematical methods and programs.

This paper proposes a technique based on comparing the transient characteristics of L-shaped and P-shaped (natural) schemes of element replacement with inductive connections and fixation of their coincidence point.

The obtained results allow upgrading the efficiency of electromagnetic product design and accuracy in implementation of electrical and electrotechnical equipment design.

Keyword: mutual inductance, coupling coefficient, transient characteristic

– индуктивности и активные сопротивления обмоток;

– свойства используемого магнитного материала;

– коэффициент взаимной индуктивности M и некоторые другие в зависимости

от особенностей проектируемого изделия.

В частности, M должен вычисляться на основании известных коэффициентов связи между обмотками K_s .

Электромагнитными процессами в трансформаторах исследователи теории и практическими задачами в этом направлении занимаются десятки лет.

Примерами, популярными в XX веке, могут стать труды [1, 2] и множество других.

В литературе часто приводится допущение: $K_s = 1$. Это допущение может внести заметную погрешность в расчёты, которые требуют достаточно высокой точности, особенно при значениях K_s , существенно меньших единицы.

Это относится ко всем трансформаторам, в особенности работающим на частотах питающей сети, превышающих сотни и тысячи герц.

Параметры Г-образной схемы замещения можно рассчитать по конструкции или измерить на готовом изделии, используя опыты холостого хода и короткого замыкания [3].

Однако при проектировании трансформатора необходимо заранее определить па-

раметры реальной схемы, которые и будут заложены в изделие [3].

Схема замещения с сосредоточенными элементами не может быть полностью адекватной реальному трансформатору, параметры которого являются распределёнными.

Предлагается критерий достоверности преобразования схем, который заключается в совпадении их импульсных или переходных характеристик (реакций на единичное или ступенчатое воздействие) в точке временной оси, соответствующей половине периода предполагаемой частоты основной гармоника сигнала, значений активных и реактивных сопротивлений цепи питания и нагрузки.

В источниках питания (ИП) электротехнологического назначения частота и другие факторы могут не быть постоянными. Это характерно для преобразователей с частотно-импульсной и широтно-импульсной модуляцией, где изменяются основная частота, амплитудный спектр, сопротивление нагрузки [4].

Параметры схем замещения следует находить в реальном диапазоне изменения их значений.

На рис. 1 показаны варианты схем замещения элемента с индуктивной связью.

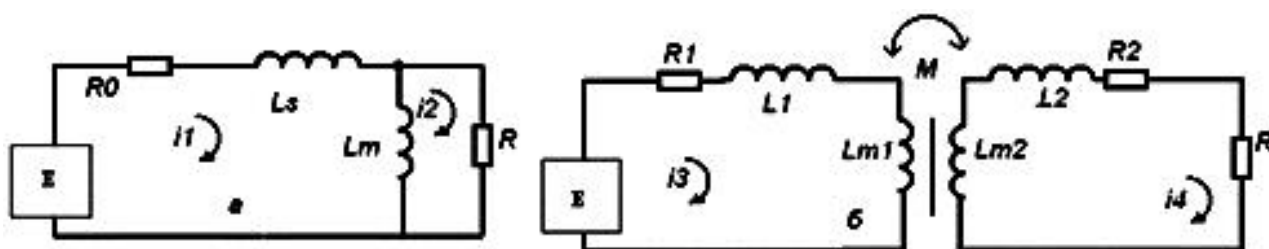


Рис. 1. Схемы замещения трансформатора:
а – Г-образная; б – П-образная

Для создания модели в пакете MATLAB SIMULINK POWER SYSTEMS (SPS) и настройки модели трансформатора требуются значения сосредоточенных индуктивностей рассеяния каждой обмотки.

Эти значения существенны для проектирования автономных инверторов с резонансной коммутацией, когда используется в SPS модели блок Mutual Inductance (на рис. 1 б – $L1, L2$).

1. Вывод соотношений, приводящих систему с распределёнными параметрами к сосредоточенной индуктивности L_s , имитирующей рассеяние магнитного потока.

Реактивная энергия, циркулирующая в объёме, где действует поле рассеяния:

$$W_m = \frac{\mu_0 \cdot H^2 \cdot V}{2}, \text{ Дж.} \quad (1)$$

В этом выражении $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума и (приблизительно) немагнитных материалов, H – напряжённость магнитного поля:

$$H = \frac{I_1 \cdot w_1}{l_m}, \text{ А/м}, \quad (2)$$

где w_1 – количество витков намагничивающей обмотки трансформатора; l_m – средняя длина магнитной силовой линии магнитопровода, м; I_1 – намагничивающий ток, А; V – объём пространства, в котором существует реактивная энергия, или «трубки», торец которой занимает эквивалентную площадь S_k и зависит от конструкции трансформатора, м³.

Реактивная энергия, циркулирующая в сосредоточенной индуктивности L_s :

$$W_{LS} = \frac{L_s \cdot I_1^2}{2}, \text{ Дж}. \quad (3)$$

Приравняв (1) и (3), решив относительно L_s , получим выражение для сосредоточенной индуктивности рассеяния, приведённой к обмотке намагничивания:

$$L_s = \frac{\mu_0 \cdot w_1^2}{l_m^2} = \frac{\mu_0 w_1^2 \cdot S_k \cdot R_g}{l_m}, \text{ Гн}, \quad (4)$$

где R_g – коэффициент Роговского, имитирующий эффект «выпучивания» поля, обычно в диапазоне 1,05-1,2.

При вычислении площади S_k должны учитываться размеры воздушных каналов, изоляции обмоток и при допущении об экспоненциальном законе затухания напряжённости поля в обмотках 1/3 толщины слоёв обмоток.

Распределение полной индуктивности рассеяния между n нагруженными обмотками многообмоточного трансформатора может быть определено выражением (4), составляющей индуктивности рассеяния, пропорциональной квадрату количества витков n -й обмотки

$$L_n = \frac{L_s \cdot w_n^2 \cdot w_1^2}{\sum_{s=1}^n w_s^4}, \text{ Гн}. \quad (5)$$

Здесь L_n – вклад n -й обмотки в общую индуктивность рассеяния; w_n – количество витков n -й обмотки.

Для 2-обмоточного трансформатора:

$$L_1 = \frac{L_s \cdot w_1^4}{w_1^4 + w_2^4}; \quad L_2 = \frac{L_s \cdot w_2^2 \cdot w_1^2}{w_1^4 + w_2^4}, \text{ Гн}. \quad (6)$$

Методика вычисления параметров

Расчёт проводится в несколько этапов.

Этап 1. Расчёт электромагнитных параметров и визуализация основных элементов конструкций трансформаторов. В расчётах применены пакеты символьный MAPLE и численный MATLAB [5-7].

Исходные данные для расчёта трансформаторов в пакете MATLAB.

LC0=0.2;	Длина стержня, м
LCA=0.25;	Длина ярма, м
A=0.08;	Толщина магнитопровода, м
B=0.07;	Ширина магнитопровода, м
RO=1.7e-8;	Уд. сопротивление провода, Ом*м
M0=4*pi*10^(-7);	Магнитная постоянная, Гн/м
MR=1000;	Относительная магнитная проницаемость
FR=50;	Частота, Гц
P=3200;	Активная мощность нагрузки, Вт
R=1;	Активное сопротивление нагрузки, Ом
BM=1.2;	Допустимая индукция, Тл
DH0=0.0005;	Размер немагнитного зазора, м
Tmax=373;	Температура перегрева, К
Tex=313;	Температура окружающей среды, К
Twr=1;	Относительная продолжительность работы

$Di0=0.01$;	Толщина изоляции магнитопровода, м
$Di1=0.001$;	Толщина изоляции 1 обмотки, м
$Di2=0.0001$;	Толщина изоляции 2 обмотки, м
$DH1=0.003$;	Ширина воздушного канала стержень – 1 обмотка, м
$DH2=0.003$;	Ширина воздушного канала 1 – 2 обмотки, м
$P0=3$;	Удельная мощность потерь, Вт/кг
$Di12=0.001$;	Толщина изоляции между 1 и 2 обмотками, м
$\Gamma_{am}=8900$;	Плотность материала обмоток, кг/м ³
$\Gamma_{af}=7800$;	Плотность материала магнитопровода, кг/м ³
$E=100$;	Амплитуда напряжения (импульса) сети, В
$D_{max}=3$;	Допустимая плотность тока, А/мм ²

Эскизы конструкций рассчитанных изделий приведены на рис. 2, 3.

Пример 1. Трансформатор с броневым магнитопроводом

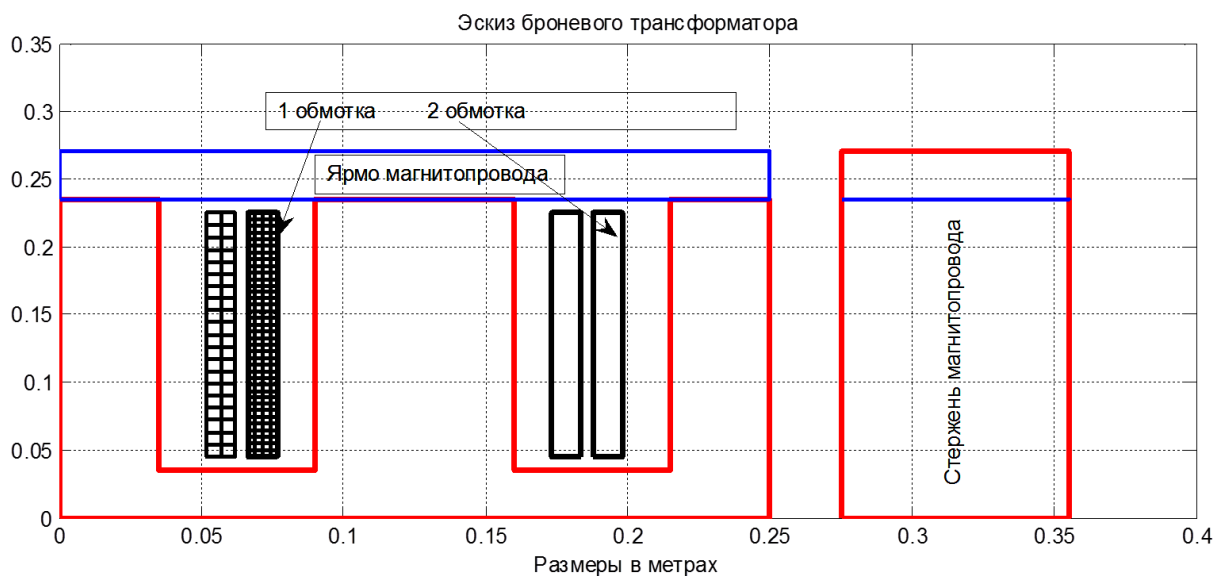


Рис. 2. Эскиз основных элементов рассчитанного броневых трансформатора

Пример 2. Трансформатор с стержневым магнитопроводом

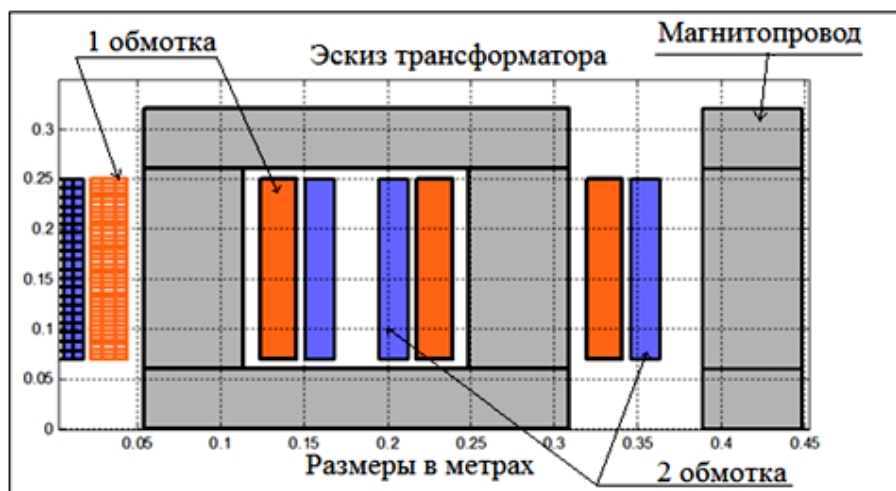


Рис. 3. Эскиз основных элементов рассчитанного стержневого трансформатора

Результаты вычислений параметров трансформаторов сведены в таблицу.

Наименование параметра и обозначение	Трансформатор броневой конструкции		Трансформатор стержневой конструкции
	единица измерения	значение	Значение
Частота сети	Гц	50	50
Количество витков первичной обмотки	—	148	223
Количество витков вторичной обмотки	—	39	58
Индуктивность намагничивания L_m	Гн	0.014	0.223
Индуктивность вторичной обмотки L_{m2}	Гн	0.000972	0.003
Индуктивность рассеяния (полная) L_s	Гн	0.0013	0.0044
Индуктивность рассеяния, приведённая к первичной обмотке L_1	Гн	0.0012	0.00044
Индуктивность рассеяния, приведённая к вторичной обмотке L_2	Гн	0.00097	0.0012
Активное сопротивление нагрузки R	Ом	1	1
Сопротивление первичной обмотки R_1	Ом	0.24	0.33
Сопротивление вторичной обмотки R_2	Ом	0.198	0.24
Коэффициент связи K_s	—	0.65	0.88
Взаимная индуктивность M	Гн	0.65	0.089

Этап 2. Вычисление токов $i_1, \dots, i_4$ по рис. 1. Система уравнений в операторной форме eq1, eq2, eq3, eq4: для Г-образной

схемы – по рис. 1 а (7), для естественной схемы – по рис. 1 б (8):

$$\begin{cases} eq1 = i_1 \cdot R_0 + p \cdot L_s \cdot i_1 + p \cdot L_m \cdot (i_1 - i_2) - E / p = 0 \\ eq2 = p \cdot L_m \cdot (i_2 - i_1) + R \cdot i_2 = 0 \end{cases}; \quad (7)$$

для П-образной (естественной) схемы по рис. 1 б система уравнений eq3, eq4 (7):

$$\begin{cases} eq3 = i_3 \cdot R_1 + p \cdot (L_{m1} + L_1) \cdot i_3 - p \cdot M \cdot i_4 - E / p = 0 \\ eq4 = p \cdot (L_{m2} + L_2) \cdot i_4 + i_4 \cdot (R + R_2) - p \cdot M \cdot i_3 = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

На этом этапе в пакете MAPLE решаются системы (7), (8) относительно изображений токов i_2, i_4 , после подстановки чисел кроме K_s, L_s вычисляется их оригинал (обратное преобразование Лапласа) в виде переменных h_1, h_2 . Определяются точки совпадения импульсных характеристик на

половине периода основной гармоники и соответствующих значений M и K_s при уменьшении K_s от 1 с дискретностью δ и амплитудой импульса E . Выражения переходных характеристик h_1, h_2 при амплитуде ступени $E = 100$ в виде фрагмента MAPLE-файла показаны на рис. 4.

$$h_1 := \frac{4.460 \cdot 10^5 e^{-2.242 t - \frac{0.5500 t}{L_s}} \sinh \left(\frac{0.0002242 t \sqrt{6.017 \cdot 10^6 + 4.014 \cdot 10^7 L_s + 1.000 \cdot 10^8 L_s^2}}{L_s} \right)}{\sqrt{6.017 \cdot 10^6 + 4.014 \cdot 10^7 L_s + 1.000 \cdot 10^8 L_s^2}}$$

$$h_2 := \frac{5.542 \cdot 10^{15} K_s e^{-4.154 \cdot 10^{21} - 3.708 \cdot 10^{22} L_s - 8.274 \cdot 10^{22} L_s^2 + 4.154 \cdot 10^{21} K_s^2} \sinh \left(\frac{4.969 \cdot 10^9 t \sqrt{1.582 \cdot 10^{28} L_s^2 + 7.089 \cdot 10^{27} L_s + 7.942 \cdot 10^{26} + 2.127 \cdot 10^{25} K_s^2}}{4.154 \cdot 10^{21} + 3.708 \cdot 10^{22} L_s + 8.274 \cdot 10^{22} L_s^2 - 4.154 \cdot 10^{21} K_s^2} \right)}{\sqrt{1.582 \cdot 10^{28} L_s^2 + 7.089 \cdot 10^{27} L_s + 7.942 \cdot 10^{26} + 2.127 \cdot 10^{25} K_s^2}}$$

Рис. 4

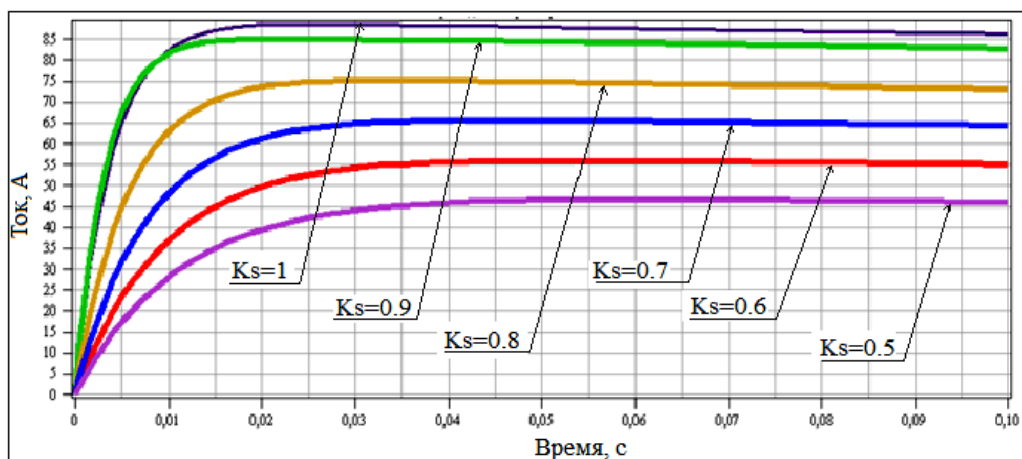


Рис. 5. Временные диаграммы переходных характеристик h_1 , h_2 по рис. 4 (MAPLE).
 h_1 – при $K_s = 1$; h_2 – при изменении K_s от 1 до 0,5

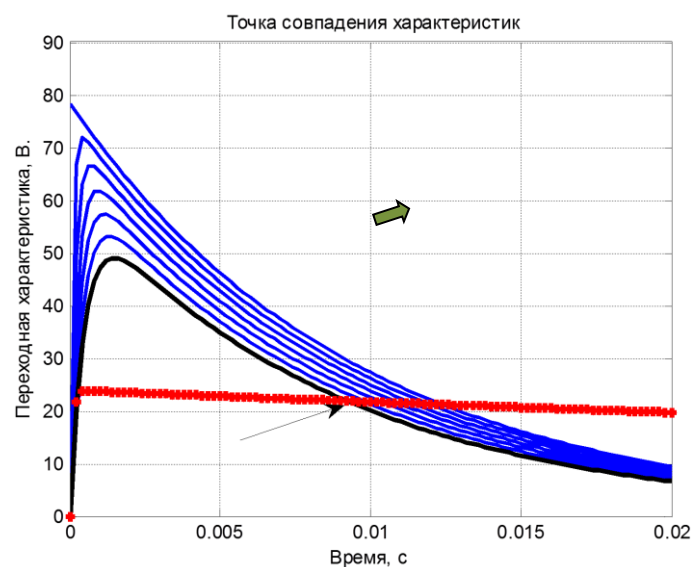


Рис. 6. Определение точки совпадения импульсных характеристик

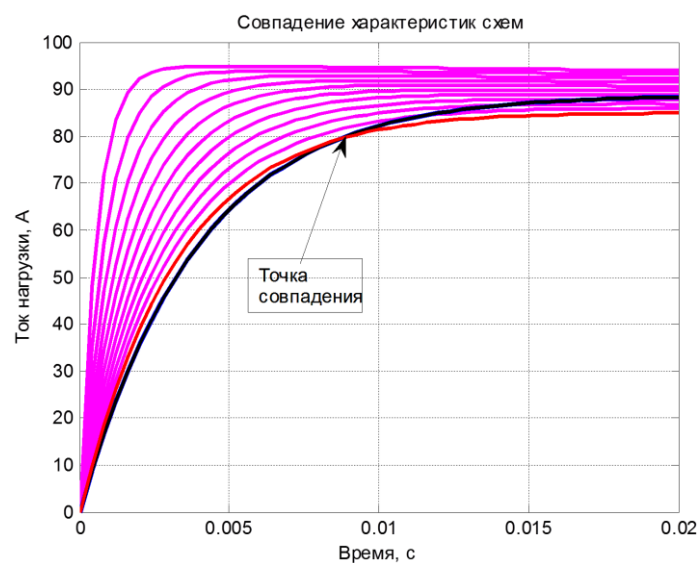


Рис. 6. Определение точки совпадения переходных характеристик (пример 2)

В примере 1 определяются параметры трансформатора при уменьшении K_s от 1 с дискретностью Δ до совпадения импульсных характеристик.

Этап 3. Проверка и подтверждение результатов посредством моделирования в пакете SIMULINK POWER SYSTEMS (SPS, MATLAB).

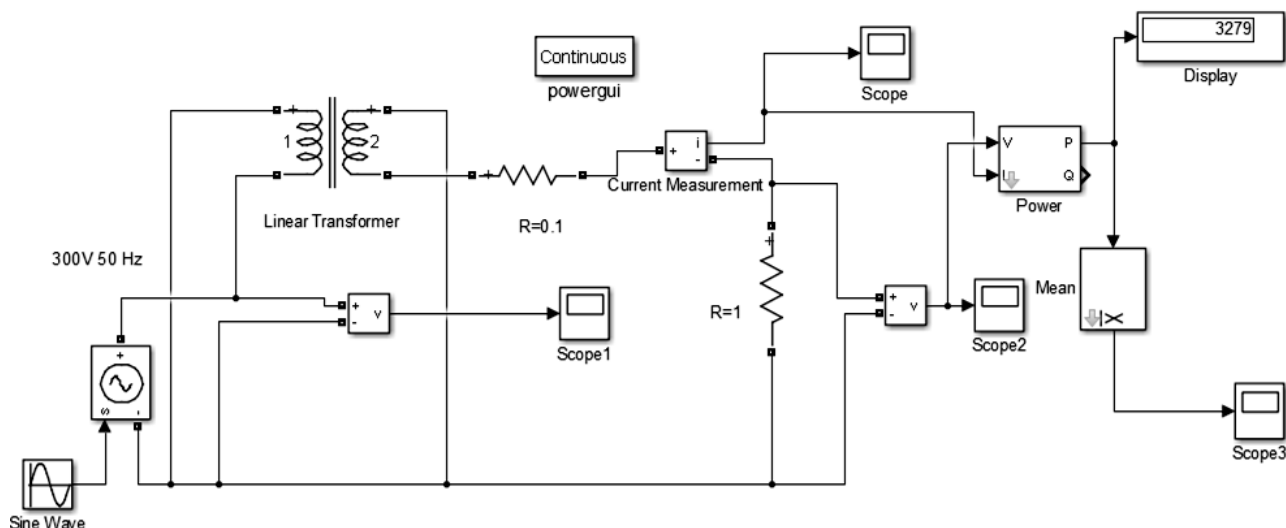


Рис. 7. Структурная схема SPS модели с линейным трансформатором

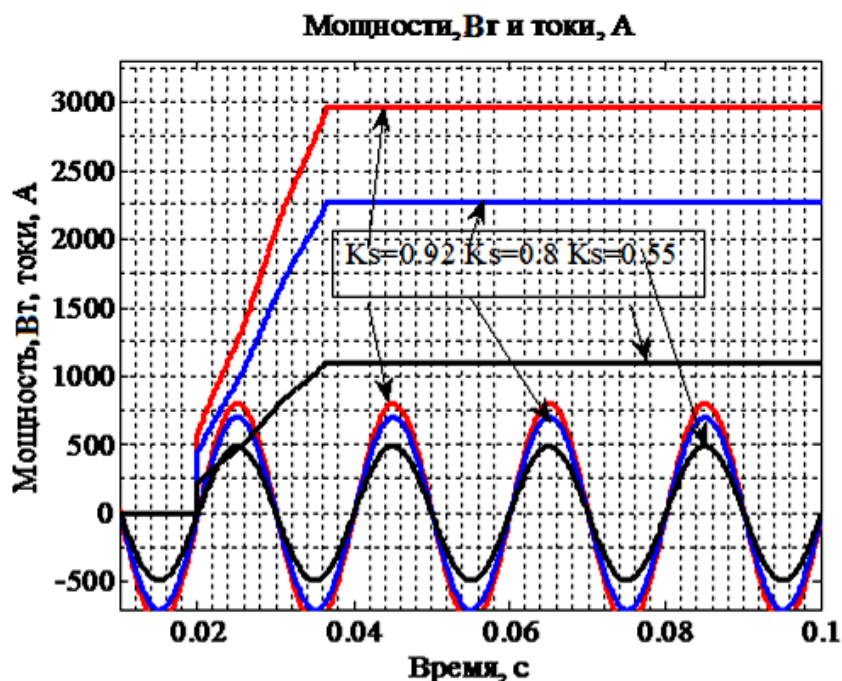


Рис. 8. Результат моделирования переходного процесса (зависимость активной мощности и тока нагрузки) от значений K_s . Входной сигнал – переменное напряжение сети.

Для наглядности график тока умножен на 10

Выводы

1. В работе изложена, реализована в современных программах и на математических моделях методика нахождения характеристик электромагнитных изделий, использующих магнитосвязанные

обмотки и необходимых в процессе их проектирования.

2. Результаты вычислений в пакете MAPLE обеспечили вывод основных аналитических выражений и экспорт в MATLAB.

3. В пакете MATLAB вычислены иско-
мые электромагнитные параметры, визуа-
лизированы элементы конструкции рассчи-
танных изделий.

4. Методика обеспечивают точность
проектирования трансформаторов и повто-
ряемость при их массовом производстве.

5. Результаты применены в научно-
исследовательских работах авторов и в учеб-
ном процессе бакалавров и магистров
направления «Электроэнергетика и электро-
техника» Санкт-Петербургского государ-
ственного электротехнического университета
«ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихомиров П.М.** Расчёт трансформа-
торов: учеб. пособие для вузов /
П.М. Тихомиров. 5-е изд., перераб. и доп.
М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.

2. **Бальян Р.Х.** Трансформаторы для
радиоэлектроники / Р.Х. Бальян. М: Сов.
радио, 1971. 720 с.

3. **Матханов П.М.** Расчёт импульсных
трансформаторов / П.М. Матханов,
Л.З. Гоголицын. Л.: Энергия, 1981. 108 с.

4. **Кошелев П.А.** Параметры обмотки
электромагнитного изделия / П.А. Кошелев,
С.В. Парамонов // Проблемы электроэнер-
гетики: сб. науч. тр. 2018. № 2 (19). Сара-
тов, 2018. С. 72-79.

5. **Кошелев П.А.** Компьютерно-
информационные технологии анализа
и синтеза электротехнических комплексов

(ЭТК): учеб. пособие: в 3 ч. Ч. 1. Линейные
динамические системы / П.А. Кошелев,
С.В. Парамонов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ
«ЛЭТИ», 2016. 39 с.

6. **Кошелев П.А.** Компьютерно-
информационные технологии анализа и син-
теза электротехнических комплексов (ЭТК):
учеб. пособие: в 3 ч. Ч. 2. Нелинейные и не-
стационарные динамические системы /
П.А. Кошелев, С.В. Парамонов. СПб.: Изд-во
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 31 с.

7. **Кошелев П.А.** Компьютерно-
информационные технологии анализа
и синтеза электротехнических комплексов:
учеб. пособие: в 3 ч. Ч. 3. Импульсные
и цифровые системы / П.А. Кошелев,
С.В. Парамонов, К.Ю. Блинов. СПб.: Изд-
во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 43 с.

Кошелев Пётр Александрович – профессор
кафедры «Электротехнологическая и пре-
образовательная техника» Санкт-
Петербургского государственного электро-
технического университета

Блинов Кирилл Юрьевич – доцент
кафедры «Электротехнологическая и пре-
образовательная техника» Санкт-
Петербургского государственного электро-
технического университета

Блинов Юрий Иванович – профессор
кафедры «Электротехнологическая и пре-
образовательная техники» Санкт-
Петербургского государственного электро-
технического университета

Pyotr A. Koshelev – Professor, Department
of Electrotechnological and Converter Equip-
ment, St. Petersburg State University of Elec-
trical Engineering

Kirill Yu. Blinov – Associate Professor, De-
partment of Electrotechnological and Convert-
er Equipment, St. Petersburg State University
of Electrical Engineering

Yuri I. Blinov – Professor, Department of
Electrotechnological and Converter Equip-
ment, St. Petersburg State University of Elec-
trical Engineering

Статья поступила в редакцию 19.02.2021, принята к опубликованию 26.02.2021

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 621.3.019.3

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ

**Р.С. Литвиненко, А.Э. Аухадеев, А.Н. Хуснутдинов,
И.С. Антипанова, Л.Н. Киснеева**

APPROACH TO DEFINING AN INTEGRATED RELIABILITY INDEX FOR ENGINEERING SYSTEMS AT THE DESIGN STAGE

**R.S. Litvinenko, A.E. Auhadeev, A.N. Khusnutdinov,
I.S. Antipanova, L.N. Kisneeva**

В статье предлагается подход к формированию интегральных показателей надежности альтернативных вариантов разрабатываемой технической системы. Подход базируется на использовании метода анализа иерархий, разработанного Т. Саати и широко применяемого при решении различных многокритериальных задач. Интегральный показатель надежности вариантов технической системы представляет собой единый показатель, синтезирующий отдельные единичные и комплексные показатели надежности, заданные в техническом задании. Использование для определения уровня надежности интегрального показателя позволяет получить формализованный результат, выражаемый через соответствующее значение вектора глобальных приоритетов и дающий возможность количественной оценки превосходства в плане надежности одного альтернативного варианта технической системы над другим.

Ключевые слова: надежность, система, показатель, анализ, метод, иерархии, уровень, декомпозиция, этап

The paper suggests an approach to formation of integrated reliability measures for the alternatives of the developed engineering system. This approach is based on the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) developed by Thomas L. Saaty and widely used in addressing various multicriteria problems. The integrated reliability measure for the options of the engineering system is a consolidated characterization that synthesizes individual single and complex reliability measures defined in the specification. The use of the integrated measure to determine the level of reliability makes it possible to obtain a formalized result that is expressed through the corresponding value of the vector of global priorities and facilitates quantification of superiority in terms of reliability of one alternative of the engineering system over another.

Keywords: dependability, system, measure, analysis, method, hierarchy, level, decomposition, stage

При задании требований по надежности технического объекта на стадии формирования исходных технических требований и разработки технического задания определяют и согласовывают между заказчиком и разработчиком номенклатуру и значения показателей надежности (ПН). Состав задаваемых ПН выбирают из числа показателей регламентированных ГОСТ 27.002-2015¹ и в соответствии с положениями ГОСТ 27.003-2016². Количество задаваемых ПН должно быть минимальным в целях снижения затрат на проверку, подтверждение и оценку заданных ПН при изготовлении и в эксплуатации. В то же время эти показатели должны быть достаточными и в полной мере характеризовать надежность технического объекта на всех этапах жизненного цикла. Для сложных технических систем используются комплексные ПН или определенный набор единичных показателей безотказности и ремонтпригодности, а также их комбинации. Если технический объект в процессе эксплуатации может находиться на хранении или транспортироваться, то также необходимо задание показателей сохраняемости, а также задание показателей долговечности, если для технического объекта определены критерии достижения предельного состояния. Численные значения ПН устанавливают расчетными, экспериментальными или расчетно-экспериментальными методами с использованием справочных статистических данных о надежности аналогов (прототипов) разрабатываемого технического объекта, а также данных эксплуатации и испытаний, полученных от поставщиков компонентов. Разрабатываемый технический объект соответствует требованиям по надежности при условии соответствия установленным требованиям всех ПН [1, 2].

Анализ ГОСТ 27.003-2016 позволяет сделать вывод, что для сложных техниче-

ских систем, если они являются восстанавливаемыми, а также для них определены требования к долговечности и сохраняемости, общее количество задаваемых единичных и комплексных ПН находится в пределах 5-7 показателей. В ситуации, когда техническая система является уникальной, состоящей из перспективных, не имеющих аналогов элементов, достаточно того, чтобы все заданные ПН соответствовали установленным в техническом задании требованиям. Однако часто на практике в состав разрабатываемой или модернизируемой технической системы частично или полностью входят существующие элементы, для которых известны статистические данные о надежности. Поэтому на этапе разработки может быть несколько возможных схемно-конструктивных вариантов построения подобных систем, соответствующих заданным требованиям по надежности. Большое значение приобретает взвешенный подход к проблеме выбора того или иного проекта системы, представляющий собой решение многокритериальной задачи сравнительной оценки уровней надежности как одного из технических требований предложенных к разработке вариантов. Также в соответствии с ГОСТ 15.016-2016³ аналогично требованиям по надежности в техническом задании указывают требования, характеристики, нормы, показатели и другие параметры, определяющие назначение, эксплуатационные характеристики разрабатываемых изделий. Поэтому перед разработчиком встает задача выбора такого варианта технической системы, который бы удовлетворял всем техническим требованиям (требованиям к эксплуатации, стойкости, электромагнитной совместимости и т. д.), в том числе требованиям по надежности, указанным в задании. Различные схемно-конструктивные варианты технической системы имеют разные по величине количественные ПН, не позволяющие однозначно

¹ ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения.

² ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

³ ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.

отдать предпочтение тому или иному техническому решению. При этом разница между ПН может быть от незначительной до существенной, а превосходство одного варианта технического решения над другим возможно только в отдельных показателях из заданных в требованиях по надежности.

Таким образом, актуальность проведенного исследования обусловлена объективной необходимостью в формировании такого показателя надежности R , который характеризовал бы всю совокупность основных свойств надежности технической системы при условии соответствия требованиям по надежности всех заданных в техническом задании отдельных показателей [3]. В связи с тем, что в ГОСТ 27.002-2015 определения и перечень комплексных показателей строго регламентированы, предложено назвать этот показатель интегральным показателем надежности (ИПН).

Необходимо отметить, что авторы не ставят задачу разработки подхода к оценке ИПН технической системы; цель предложенной методики – определение обобщенных показателей для нескольких схемно-конструктивных вариантов, синтезирующих отдельные ПН в единый. На следующем этапе оценки технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемой системы уже с учетом всех требований, указанных в техническом задании, численное значение, характеризующее надежность, будет представлено одним единым показателем – ИПН, а не набором единичных и комплексных ПН.

В общем случае метод аналитических иерархических процессов или метод анализа иерархий (МАИ) представляет собой математический аппарат системного подхода к технологии принятия решений на основе расчетов и использования метода попарных сравнений, позволяющего найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом соответствует сути поставленной проблемы и требованиям к ее решению. Метод был разработан американским ученым Томасом Саати в 1970 году и активно используется при решении различных многокритериальных задач (анализ возможных вариантов раз-

вития событий, составления рейтинга, распределение ресурсов, управление рисками и др.). Также МАИ получил широкое распространение при практическом решении задач сравнительного анализа технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемых технических объектов [4-6].

Подробное описание содержания этапов МАИ и решение с его помощью различных задач широко представлены в источниках [7-9].

МАИ обладает следующими достоинствами:

- учитывает различные факторы и множественность целей;
- учитывает возможный эффект взаимодействия факторов;
- сравнительная простота математических вычислений;
- для попарных сравнений используется шкала относительной важности, упорядочивающая и упрощающая процедуру выставления экспертных оценок;
- обладает возможностью присвоения альтернативным вариантам рангов (цифровых показателей, отображающих значимость или важность объекта).

Последнее положение предлагается использовать для формирования количественного значения ИПН альтернативных вариантов технической системы, где в качестве критериев будут выступать соответствующие им ПН [10]. В качестве ИПН предлагается применить вычисленные значения глобальных (составных) приоритетов. Обращаем внимание, что определение ИПН осуществляется для конкретных структурно-схематических вариантов построения разрабатываемой системы и соответствующих им количественных значений ПН. Изменение какого либо из этих положений приведет к повторному определению ИПН.

В качестве недостатка МАИ можно отметить:

- количество показателей не должно превышать 7 ± 2 , так как человеческое сознание не способно к одновременному восприятию и переработке более указанного числа блоков информации [11];

– метод позволяет найти ранги выбранных альтернатив, но не имеет внутренних средств интерпретации этих рангов;

– несмотря на проверку согласованности суждений экспертов, экспертные оценки носят субъективный характер.

Проверку работоспособности и адекватности предложенного подхода к решению задачи определения ИПН методом анализа иерархий для последующей оценки технического уровня структурно-схематических вариантов разрабатываемой технической системы проведем на конкретном примере.

Для разрабатываемого многодвигательного электропривода (МЭП) применяемого на электрическом транспорте заказчик

в техническом задании установил следующие требования по надежности:

– гамма-процентная наработка до отказа $T_{\gamma=95}$ – не менее 7500 ч;

– средняя наработка на отказ T_0 – не менее 12000 часов;

– средний срок службы до капитального ремонта $T_{сл.кр.р.}$ – не менее 5 лет;

– коэффициент готовности K_g – не менее 0,99;

– средний срок службы до списания $T_{сл.сп.сн}$ – не менее 20 лет.

Разработчиком предложены три возможных варианта МЭП с предварительно рассчитанными значениями показателей, приведенными в табл. 1.

Таблица 1 – Показатели надежности вариантов МЭП

Варианты	Показатели надежности				
	$T_{\gamma=95}$, ч	T_0 , тыс. ч	$T_{сл.кр.р.}$, лет	K_g	$T_{сл.сп.сн}$, лет
№ 1	7,6	12,5	7	0,998	22
№ 2	8	13,5	6,5	0,999	24
№ 3	5,2	14	5	0,994	25

Используя МАИ, требуется рассчитать ИПН R_1 , R_2 и R_3 альтернативных вариантов МЭП, для последующего комплексного анализа соответствия всех технических требований к разрабатываемой системе.

Декомпозиция задачи в иерархию. Декомпозиция задачи вычисления ИПН представлена на рис. 1.

В наиболее элементарном виде иерархия состоит из вершины (условно здесь находится общая цель – формирование ИПН), от которой идут промежуточные уровни, состоящие из пяти критериев (показателей надежности), уточняющих цель, к нижнему уровню, состоящему из 3 альтернативных вариантов МЭП. Такая иерархия называется доминантной.

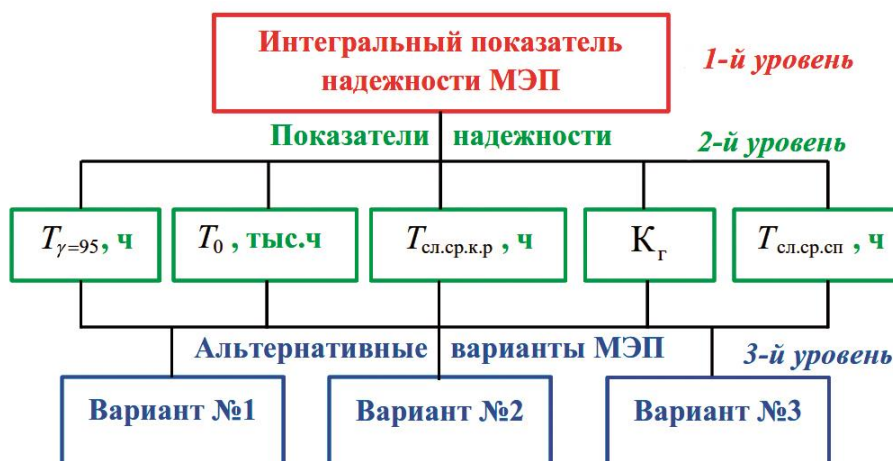


Рис. 1. Декомпозиция задачи вычисления ИПН вариантов МЭП

Построение матриц попарных суждений. При использовании МАИ решаемая задача была представлена иерархически, поэтому матрица сравнения важности ПН второго уровня составляется относительно общей цели (1-го уровня). Подобные матрицы также строятся для парных сравнений каждого альтернативного варианта МЭП по отношению к элементам 2-го уровня. Для проведения субъективных парных сравнений автором Т. Саати была разработана численная шкала относительной важности [8], в соответствии с которой экспертами определяется вес функций (показателей), характеризующих разрабатываемую систему.

Для построения матрицы попарных суждений для 2-го уровня A_1 размерностью $k \times k$, где $k = 5$ – количество заданных ПН, составляется таблица в k строк и столбцов, в которой в заголовках граф и строк записываются

применяемые при формировании ИПН и заданные в техническом задании показатели. Действия начинают с показателя, расположенного в заголовке 1-й строки (гамма-процентная наработка до отказа $T_{\gamma=95}$), при этом задаются вопросом, насколько этот показатель важнее показателей, указанных в заголовке графы, соответственно, средней наработки на отказ T_0 , и далее остальные показатели. При сравнении показателя с самим собой отношение равно единице. Если сравниваемый показатель важнее, чем ПН из заголовка графы, то используется целое число из шкалы относительной важности [6], в противном случае – обратная величина. Таким образом, поочередно производится сравнение важности всех ПН между собой и определяются все элементы матрицы A_1 попарных сравнений для 2-го уровня (уровня ПН) (табл. 2).

Таблица 2 – Матрица A_1 попарных сравнений для второго уровня

Показатели	$T_{\gamma=95}, j = 1$	$T_0, j = 2$	$T_{сл.кр.к.р.}, j = 3$	$K_z, j = 4$	$T_{сл.кр.сп.}, j = 5$
$T_{\gamma=95}$	1	3	4	1	5
T_0	1/3	1	4	2	3
$T_{сл.кр.к.р.}$	1/4	1/4	1	1/5	3
K_z	1	1/2	5	1	6
$T_{сл.кр.сп.}$	1/5	1/3	1/3	1/6	1

Примечание: $j = \overline{1, k}$ – порядковый номер показателя надежности.

Составление матриц $A_{2j}, (j = \overline{1, k})$ для 3-го уровня (уровня альтернативных вариантов) существенно упрощается, так как значения ПН выражены количественно, а не качественно. Элементы матриц $A_{2j}, (j = \overline{1, k})$ формируется делением значений ПН соответствующих альтернативных вариантов МЭП применительно к каждому показателю j (матрицы $A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}$ и A_{25}). Матрицы A_{2j} попарных сравнений для третьего уровня представлены в табл. 3.

Таким образом, результатом действий на этом этапе является матрица A_1 попарных сравнений для уровня ПН и матрицы

$A_{21} \dots A_{25}$ для уровня альтернативных вариантов МЭП.

Определение локальных приоритетов и согласованности мнений экспертов для второго уровня. Для матрицы A_1 попарных сравнений уровня показателей определяется набор локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества верхних элементов на нижний элемент иерархии. При этом устанавливается вес каждого отдельного компонента матрицы.

С этой целью необходимо вычислить собственный вектор $\bar{A} = [x_1 \dots x_k]^T$ матрицы A_1 , составляющими которого являются оценки вектора приоритетов по строкам матрицы x_i , определяемые по формуле

$$x_i = \frac{\bar{a}_i}{\sum_{i=1}^k \bar{a}_i},$$

где $\bar{a}_i = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k a_i}$ – среднее геометрическое элементов i -й строки матрицы A_1 , $j = \overline{1, k}$.

Таблица 3 – Матрицы попарных сравнений для уровня альтернативных вариантов МЭП

Матрица A_{21} попарных сравнений для показателя $T_{\gamma=95}$			
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	7,6/8=0,95	7,6/8,2=0,9268
Вариант № 2	8/7,6=1,0526	1	8/8,2=0,9756
Вариант № 3	8,2/7,6=1,0789	8,2/8=1,025	1
Матрица A_{22} попарных сравнений для показателя T_0			
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	12,5/13,5=0,9259	12,5/14=0,8929
Вариант № 2	13,5/12,5=1,08	1	13,5/14=0,9643
Вариант № 3	14/12,5=1,12	14/13,5=1,037	1
Матрица A_{23} попарных сравнений показателя $T_{сл.кр.р.}$			
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	7/6,5=1,0769	7/5=1,4
Вариант № 2	6,5/7=0,9586	1	6,5/5=1,3
Вариант № 3	5/7=0,7143	5/6,5=0,7692	1
Матрица A_{24} попарных сравнений показателя K_c			
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	0,998/0,999=0,999	0,998/0,994=1,004
Вариант № 2	0,999/0,998=1,001	1	0,999/0,994=1,005
Вариант № 3	0,994/0,998=0,996	0,994/0,999=0,995	1
Матрица A_{25} попарных сравнений показателя $T_{сл.кр.сн}$			
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	22/24=0,999	22/25=1,004
Вариант № 2	24/22=1,001	1	24/25=1,005
Вариант № 3	25/22=0,996	25/24=0,995	1

В условиях решения нашей задачи собственный вектор $\bar{A}$ матрицы A_1 получил следующие значения:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3573 \\ 0,2388 \\ 0,0817 \\ 0,2708 \\ 0,0514 \end{bmatrix},$$

где x_1 – оценка приоритета показателя $T_{\gamma=95}$; x_2 – оценка приоритета показателя T_0 ; x_3 – оценка приоритета показателя $T_{сл.кр.р.}$; x_4 – оценка приоритета показателя K_c ; x_5 – оценка приоритета показателя $T_{сл.кр.сн}$.

Вычисление вектора локальных приоритетов (собственных векторов матрицы A_1) $\lambda_{\max} = [\lambda_{\max 1} \dots \lambda_{\max k}]$ производится путем приведения величины x_i

к нормализованному виду по следующей формуле:

$$\lambda_{\max i} = x_i \cdot \sum_{j=1}^k a_{ij},$$

где $\lambda_{\max i}$ – собственные значения вектора Перрона; a_{ij} – значение элемента матрицы A_1 в i -й строке j -м столбце, $j = \overline{1, k}$.

Используя описанную процедуру, определим локальные приоритеты $\lambda_{\max i}$ для второго уровня (уровня показателей). В условиях решения задачи формирования ИПН альтернативных вариантов МЭП вектор локальных приоритетов представлен следующими значениями:

$$\lambda_{\max} = \begin{bmatrix} 0,9945 \\ 1,2139 \\ 1,171 \\ 1,1825 \\ 0,9252 \end{bmatrix}.$$

Сумма всех элементов полученного вектора локальных приоритетов $\lambda_{\max}$ равна 5,4871, называется Перроново собственное значение, обозначим ее буквой Λ . При абсолютной согласованности матрицы соблюдается условие $\Lambda = k$.

После определения локальных приоритетов $\lambda_{\max i}$ и величины Λ следует процедура оценки согласованности мнений экспертов при формировании матрицы попарных сравнений A_1 для второго уровня, поскольку обобщенное мнение группы экспертов не лишено субъективности, так как использовалась качественная шкала оценок. Для этого МАИ предусматривает применение индекса согласованности (μ), который дает информацию о степени нарушения численной и порядковой согласованности. Если согласованность существенно нарушена, то рекомендуются поиск дополнительной информации и пересмотр суждений экспертов на втором туре экспертизы.

Вычисляем индекс согласованности по формуле

$$\mu = \frac{\Lambda - k}{k - 1} = \frac{5,4871 - 5}{4} = 0,1218.$$

Сравним величину μ с величиной случайной согласованности (μ_{rand}), которая получилась бы при случайном наборе количественных суждений из шкалы $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \dots, 1, 2, \dots, 9$, но при условии создания обратно симметричной матрицы. В источнике [6] приводится таблица, позволяющая определить среднюю согласованность μ_{rand} для случайных матриц различного порядка. В условиях решения нашей задачи для $k = 5$ величина $\mu_{rand} = 1,12$. Для сравнения величин μ и μ_{rand} найдем отношение согласованности по формуле

$$CR = \frac{\mu}{\mu_{rand}} \cdot 100\% = 10,9\%.$$

Величина CR должна составить 10 % или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях можно допустить 20 %, но не более. Если величина ОС превышает 20 %, необходимо провести второй тур экспертизы и уточнить элементы матрицы попарных сравнений A_1 для 2-го уровня.

Так как CR = 10,9 %, можно сделать вывод о допустимой согласованности матрицы попарных сравнений A_1 для 2-го уровня задачи формирования ИПН для альтернативных вариантов МЭП.

Определение локальных приоритетов для третьего уровня

Далее аналогичным образом определяются локальные приоритеты для 3-го уровня (уровня вариантов МЭП), результаты вычислений представлены в табл. 4.

Следует отметить, что если показатели альтернативных вариантов заданы в виде численных значений, то определять μ не нужно, так как $\mu = 0$, следовательно $\mu_{rand} = 0$. Поэтому определение μ_{rand} для 3-го уровня не производилось.

Таблица 4 – Определение локальных приоритетов для третьего уровня (уровня альтернативных вариантов)

Вариант МЭП	№ 1	№ 2	№ 3	Оценка вектора приоритетов x_i	Вектор локальных приоритетов $\lambda_{\max i}$
Для установленной безотказной наработки $T_{\gamma=95}$					
№ 1	1	0,95	0,9268	0,3193	0,9999
№ 2	1,0526	1	0,9756	0,3361	0,9999
№ 3	1,0789	1,025	1	0,3445	0,9999
Определение Λ_1					3
Для средней наработки на отказ T_0					
№ 1	1	0,9259	0,8929	0,3337	1,001
№ 2	1,08	1	0,9643	0,334	1
№ 3	1,12	1,037	1	0,3323	0,9999
Определение Λ_2					3
Для установленного срока службы до капитального ремонта $T_{сл.к.р.}$					
№ 1	1	1,0769	1,4	0,3784	1,0001
№ 2	0,9586	1	1,3	0,3514	1,0001
№ 3	0,7143	0,7692	1	0,2703	1,0001
Определение Λ_3					3,0003
Для коэффициента готовности K_g					
№ 1	1	0,999	1,004	0,3125	1
№ 2	1,001	1	1,005	0,3375	1
№ 3	0,996	0,995	1	0,35	1
Определение Λ_4					3
Для назначенного срока службы $T_{сл.ср.сн}$					
№ 1	1	0,999	1,004	0,3099	1,0001
№ 2	1,001	1	1,005	0,338	0,9999
№ 3	0,996	0,995	1	0,3521	1
Определение Λ_5					3

Определение глобальных приоритетов. Для формирования ИПН альтернатив приоритеты синтезируются, начиная с уровня показателей. Локальные приоритеты перемножаются на приоритет соответствующего ПН на вышестоящем уровне и суммируются по каждому элементу в соответствии с критерием, на который воздействует этот элемент (каждый элемент второго уровня умножается на единицу, т. е. на вес единственной цели самого верхнего уровня). Это дает составной, или глобальный, приоритет того элемента, который затем ис-

пользуется как критерий для взвешивания локальных приоритетов элементов, расположенных уровнем ниже. Как было сказано выше, величину глобального приоритета предлагается принять в качестве ИПН альтернативных вариантов.

Полученные в табл. 4 результаты представим в виде матрицы A_3 размером 5×3 , где столбцы будут соответствовать оценкам вектора приоритетов ПН второго уровня, а строки – альтернативным вариантам МЭП. Таким образом, матрица A_3 приоритетов по каждому показателю примет следующий вид:

$$A_3 = \begin{bmatrix} x_1^{(T_y)} & x_1^{(T_{cp})} & x_1^{(T_{y,cl})} & x_1^{(K_r)} & x_1^{(T_{n,cl})} \\ x_2^{(T_y)} & x_2^{(T_{cp})} & x_2^{(T_{y,cl})} & x_2^{(K_r)} & x_2^{(T_{n,cl})} \\ x_3^{(T_y)} & x_3^{(T_{cp})} & x_3^{(T_{y,cl})} & x_3^{(K_r)} & x_3^{(T_{n,cl})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3193 & 0,3337 & 0,3784 & 0,3125 & 0,3099 \\ 0,3361 & 0,334 & 0,3514 & 0,3375 & 0,338 \\ 0,3445 & 0,3323 & 0,2703 & 0,35 & 0,3521 \end{bmatrix}.$$

Для определения вектора глобальных приоритетов воспользуемся формулой

$$\bar{W} = A_3 \cdot \bar{A} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix},$$

где W_1, W_2, W_3 – глобальные приоритеты соответствующих альтернативных вариантов МЭП.

Подставив полученные для A_3 и $\bar{A}$ числовые значения, получим следующие оценки глобальных (собственных) приоритетов:

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} 0,3268 \\ 0,3372 \\ 0,3363 \end{bmatrix}.$$

Сумма глобальных приоритетов должна быть равна 1. Приравнявая вычисленные значения глобальных приоритетов W_1, W_2, W_3 показателям R_1, R_2 и R_3 , получим численные значения ИПН соответствующих вариантов МЭП, характеризующие набор единичных и комплексного ПН.

В результате решения нашей задачи наибольший ИПН соответствует второму варианту МЭП, т. к. $R_2 = 0,3372 > 0,3363 > 0,3268$. В дальнейшем эти показатели, представляющие собой обобщенный (единый) ПН, могут быть использованы наряду с другими технико-экономическими требованиями к МЭП для последующего выбора наиболее предпочтительного схемно-конструктивного варианта разрабатываемого многодвигательного электропривода.

Заключение

Анализ результатов проведенных расчетов показал адекватность и корректность предложенного подхода и его пригодность к использованию для дальнейшего анализа ИПН альтернативных вариантов разрабатываемых сложных технических систем. Предложенный механизм определения ИПН вариантов разрабатываемой технической системы является удобным инструментом научных исследований на стадии формирования исходных технических требований и разработки технического задания. Применение в этих целях МАИ позволяет выполнить глубокий анализ большого объема экспертной и статистической информации о заданных критериях надежности с учетом весовых характеристик анализируемых показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Auhadeev A.** Research of reliability of urban electric transport system / A. Auhadeev, R. Litvinenko, V. Fandeev // E3S Web of conferences. 2019. Vol. 124. № 05078.
2. **Георгиевская Е.В.** Методические принципы оценки надежности оборудования на ранних стадиях проектирования / Е.В. Георгиевская // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 11. С. 25-36.
3. **Литвиненко Р.С.** Подход к исследованию надежности электротранспортной системы города, как сложной технической системы / Р.С. Литвиненко, А.Э. Аухадеев,

- Р.Р. Залялов // Мир транспорта и технологических машин. 2017. № 3 (58). С. 108-114.
4. **Pavlov P.** A technique for selecting a rational variant of a multifunctional aircraft system / P. Pavlov, R. Litvinenko, M. Mubarachin // Russian Aeronautics. 2008. Vol. 51. № 2. P. 198-201.
5. **Li J.** Cultural ranking of countries using the analytic hierarchy process methodology / J. Li, Y. Yang, T.L. Saaty // Advances in intelligent systems and computing. 2020. Vol. 1074. P. 949-963.
6. **Saaty T.L.** The analytic hierarchy and analytic network processes for the meas-

urement of intangible criteria and for decision-making / T.L. Saaty // International series in operations research and management science. 2016. Vol. 233. P. 363-419.

7. **Saaty T.L.** Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors – The Analytic Hierarchy / T.L. Saaty // RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics). 2008. Vol. 102. № 2. P. 251-318.

8. **Быкова Т.В.** Метод анализа иерархий как инструмент решения практических задач многокритериальной оптимизации / Т.В. Быкова // Математическое моделирование, компьютерный и натурный экспери-

мент в естественных науках. 2019. № 1. С. 48-62.

9. **Гривачев А.В.** Модифицированный метод анализа иерархий для оценки наземных робототехнических комплексов / А.В. Гривачев, В.О. Авдеев, В.В. Варганов // Экстремальная робототехника. 2018. № 1. С. 409-416.

10. **Воронков И.Е.** Вектор глобальных приоритетов метода анализа иерархий как относительный показатель уровня надежности потенциальных участников инвестиционно-строительных проектов / И.Е. Воронков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 137-145.

11. **Saaty T.L.** Seven is the magic number in nature / T.L. Saaty // Proceedings of the American Philosophical Society. 2016. Vol. 160. № 4. P. 335-360.

Литвиненко Руслан Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета

Аухадеев Авер Эрикович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета

Хуснутдинов Азат Назипович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета

Антипанова Ирина Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета

Киснеева Лейла Нургалиевна – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета

Ruslan S. Litvinenko – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Complexes and Systems, Kazan State Power Engineering University

Aver A. Auhadeev – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Complexes and Systems, Kazan State Power Engineering University

Azat N. Khusnutdinov – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Complexes and Systems, Kazan State Power Engineering University

Irina S. Antipanova – Senior Lecturer, Department of Electrical Complexes and Systems, Kazan State Power Engineering University

Leila N. Kisneeva – Senior Lecturer, Department of Electrical Complexes and Systems, Kazan State Power Engineering University

Статья поступила в редакцию 22.02.2021, принята к опубликованию 16.03.2021

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 621.3.042

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАГНИТОПРОВОДА ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ

**В.Е. Вавилов, А.Х. Минияров, А.М. Веселов,
Д.Ю. Пермин, Е.А. Пронин**

RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF MECHANICAL LOADS ON ELECTROMAGNETIC INDICATORS OF THE MAGNETIC CIRCUIT MADE OF AMORPHOUS STEEL

V.E. Vavilov, A.Kh. Miniyarov, A.M. Veselov, D.Yu. Permin, E.A. Pronin

Основной целью данной статьи является исследование влияния различных механических нагрузок на электромагнитные показатели магнитопровода из аморфной стали. В статье рассмотрены перспективы применения аморфной стали в энергетике, основным достоинством которой являются низкие удельные потери при высокой частоте перемагничивания. Из-за более сложной структуры аморфная сталь может иметь высокую чувствительность к механическим нагрузкам. Для получения экспериментальных данных были изготовлены 4 одинаковых образца в виде колец из аморфной стали, 3 из которых испытывали воздействие вибрации или сжатия с разными силами. Снятие электромагнитных показателей образцов производилось с помощью двух намотанных катушек, подключенных к специальному прибору. По полученным данным построены аппроксимирующие графики с использованием метода наименьших квадратов. По полученным результатам произведено сравнение и проанализировано влияние механиче-

The main objective of the research is to study the effect of various mechanical loads on electromagnetic indicators of the magnetic circuit fabricated from the amorphous steel. The authors discuss the prospects for the use of amorphous steel in power engineering, the main advantage of which is low specific losses at a high re-magnetization frequency. Due to its more complex structure, amorphous steel can be highly sensitive to mechanical stress. To obtain experimental data, four identical samples were made in the form of rings from amorphous steel, three of which were subjected to vibration or compression by various forces. Taking the readings of electromagnetic indicators of the samples was carried out using two wound coils connected to a special device. Based on the data obtained, approximating graphs were constructed using the least square technique. Based on the obtained results, a comparison was made and the effect of mechanical stress was analyzed. It is concluded that some electromagnetic characteristics of amorphous steel, such as magnetic

ского воздействия. Сделан вывод о том, что некоторые электромагнитные показатели аморфной стали, такие как магнитная проницаемость, имеют высокую чувствительность к механическому воздействию.

Ключевые слова: *магнитопровод; индукция; насыщение; аморфная сталь; напряженность магнитного поля; вибрация; сжатие; механическое воздействие*

Электромагнитное преобразование является фундаментальным процессом в современной энергетике. С момента воспроизводства до конечного использования энергия проходит через множество электромагнитных преобразований, поэтому важно, чтобы этот процесс имел максимально возможную эффективность. Применение электротехнической стали позволяет значительно увеличить эффективность преобразования, однако такие преобразователи становятся массивными, что ограничивает область их применения.

В настоящее время самым простым решением для снижения массы магнитопровода является увеличение частоты перенамагничивания [1], которая ограничивается потерями на вихревые токи. Так, в авиационной промышленности в отличие от наземных сетей с частотой 50 Гц используется стандарт с частотой 400 Гц, а в их электромеханических преобразователях частоты доходят до 2000 Гц. Для работы с такими частотами используются электротехнические марки стали, такие как 2421 и 3424, которые представляют собой склеенные в пакеты тонкие листы из магнитомягких сталей толщиной 0,18 мм [2]. Подобные стали имеют зернистую структуру, состоящую из доменов с периодическим расположением атомов.

Дальнейшее увеличение рабочей частоты требует использования новых технологий и материалов. Применение аморфной стали позволяет значительно снизить потери на вихревые токи и повысить частоту перенамагничивания. Такая сталь изготавливается из тонкой ленты толщиной 0,035 мм, а благодаря сверхбыстрому охлаждению во время изготовления ленты

permeability, are highly sensitive to mechanical stress.

Keywords: *magnetic circuit; induction; saturation; amorphous steel; magnetic field strength; vibration; compression; mechanical impact*

атомы металла застывают в хаотическом расположении [3]. Магнитопровод, выполненный из аморфной стали, помимо низких потерь, имеет высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу и высокое удельное сопротивление, однако более сложная структура может хуже противостоять механическим воздействиям [4]. Основные электромагнитные характеристики, такие как индукция насыщения, потери в стали и магнитная проницаемость могут ухудшиться после различных воздействий, например вибрации или сжатия.

Для исследования влияния механического воздействия на магнитопровод из аморфной стали было проведено исследование. Для этого были изготовлены 4 образца колец из аморфной стали с одинаковыми геометрическими размерами (табл. 1). Среди них первый образец – без механического воздействия, второй образец был подвержен испытанию на вибростенде в течение 2 часов с частотой 25 Гц, на третий и четвертый образец было оказано давление перпендикулярно шихтовке с помощью прессы в 21 МПа и 42 МПа соответственно, после чего на все образцы были намотаны по две одинаковые обмотки. Измерение электромагнитных показателей магнитопроводов производилось с помощью специального прибора, который использует одну (силовую) обмотку образцов для создания переменного намагничивающего поля [5] напряженностью H , А/м:

$$H = \frac{I_c \omega_c}{l}, \quad (1)$$

где I – сила тока в силовой обмотке, А; l – длина магнитопроводящего контура, м.

Таблица 1 – Параметры экспериментальных образцов

Параметр	Значение
Плотность магнитопровода ρ , г/мм ³	8,3
Внешний диаметр магнитопровода D_n , мм	35
Внутренний диаметр магнитопровода $D_{вн}$, мм	25
Высота магнитопровода h , мм	5
Диаметр сечения провода силовой обмотки d_c , мм	0,475
Количество витков силовой обмотки ω_c	63
Диаметр сечения провода измерительной обмотки $d_{из}$, мм	0,475
Количество витков измерительной обмотки $\omega_{из}$	63
Толщина изоляции магнитопровода Δ , мм	0,04

Длина контура в образцах:

$$l = \frac{\pi}{2} (D_n + D_{вн}). \quad (2)$$

Под действием поля в магнитопроводе возникает индукция B [6]:

$$B = \frac{H}{\mu}, \quad (3)$$

где μ – магнитная проницаемость магнитопровода.

Вторая (измерительная) обмотка служит для измерения магнитного поля [7].

В ходе измерения были получены графики намагничивания для каждой амплитуды и частоты подводимого тока к силовой обмотке. Полученные петли гистерезиса первого образца перенамагничивания с разными амплитудами при частоте 400 Гц и 2 кГц соответственно.

С увеличением амплитуды напряженности магнитного поля коэрцитивная сила

практически не изменяется. Это объясняется отсутствием доменов, которые бы перестраивались под действием сильного магнитного поля, как в магнитомягких электротехнических сталях [8].

Далее проведем сравнение характеристик намагничивания, удельных потерь и проницаемостей образцов. Характеристика намагничивания показывает изменение магнитного потока под действием увеличивающейся магнитной напряженности [4]. Такая характеристика представляется в виде кривой намагничивания, и для ее построения необходимо найти точки, представляющие собой максимальные амплитуды напряженности магнитного поля и индукции при различных амплитудах подводимого электрического тока к намагничивающей обмотке [10]. Таким образом, для первого образца получим таблицу со следующими данными:

Таблица 2 – Значения амплитудных значений напряженности магнитного поля и индукции для 1-го образца при частоте перенамагничивания 400 Гц

H , А/м	10,8	18,1	42,78	64,65	117,7	204,3
B , Тл	0,476	0,610	0,810	0,906	1,046	1,149
H , А/м	370,1	927	2015	4731	6007	
B , Тл	1,231	1,307	1,334	1,352	1,361	

Значения, представленные в табл. 2, имеют погрешность измерения прибора, равную 2 %, поэтому на графике представлены в виде крестов с соответствующими размерами,

через которые проходит реальная кривая намагничивания для данного образца [11].

Построение кривой намагничивания осуществляется с помощью аппроксимации

данных и может выполняться несколькими методами, достигающими различной точности [12]. Поэтому для определения самого точного метода проведем сравнение по данным, приведенным в табл. 2. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля имеет нелинейный характер, поэтому будут использоваться следующие методы [13]:

экспоненциальная

$$F(x) = a_1 e^{a_2 x}, \quad (4)$$

логарифмическая

$$F(x) = a + b \cdot \ln x, \quad (5)$$

полиномиальная

$$F(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_k x^k, \quad (6)$$

степенная

$$F(x) = a \cdot x^b. \quad (7)$$

Необходимые коэффициенты для каждого метода вычислены в программе Matlab. Полученные графики изображены на рис. 1.

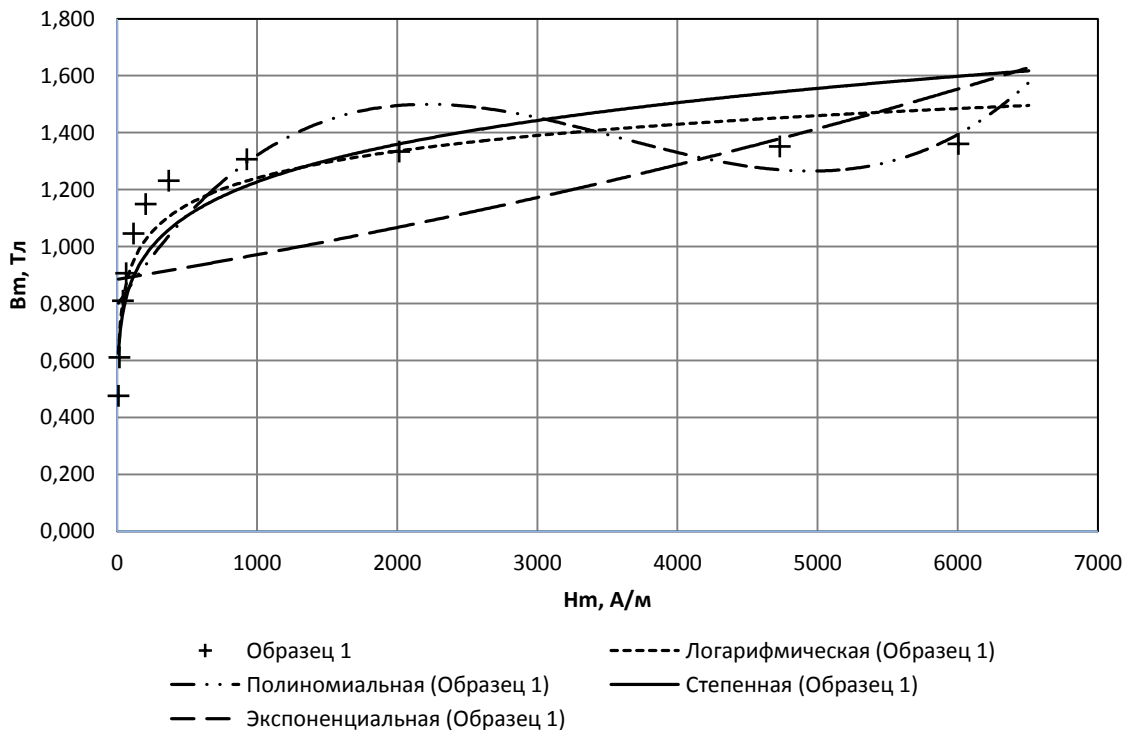


Рис. 1. Характеристики намагничивания 4 образцов при частоте 400 Гц

Наибольшей точностью по методу наименьших квадратов со средним квадратичным отклонением $\sigma = 0,105$ является аппроксимация с помощью логарифмической функции:

$$y = 0,3006 + 0,1361 \ln x,$$

поэтому сравнение кривых намагничивания между образцами будет производиться с помощью логарифмической аппроксимации.

На рис. 2 и 3 показаны графики зависимости максимальной индуктивности

от амплитудных значений напряженности магнитного поля. Из рис. 2 и 3 видно, что сжатие давлением 42 МПа снизило индукцию насыщения образца на 10-15 %. Сжатие такой силы создало разрывы, местами снижающие поперечное сечение для проходящего магнитного потока Φ [14], Вб:

$$\Phi = \frac{B_i}{S_i},$$

где $S_i, \text{ м}^2$ – площадь i -го поперечного сечения контура; $B_i, \text{ Т}$ – индукция в i -м участке.

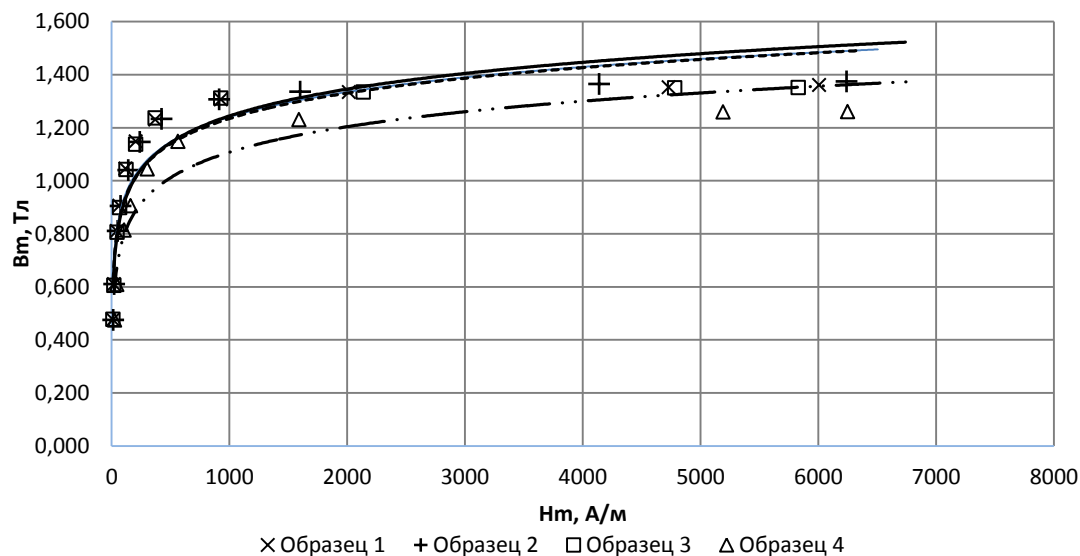


Рис. 2. Характеристики намагничивания 4 образцов при частоте 400 Гц

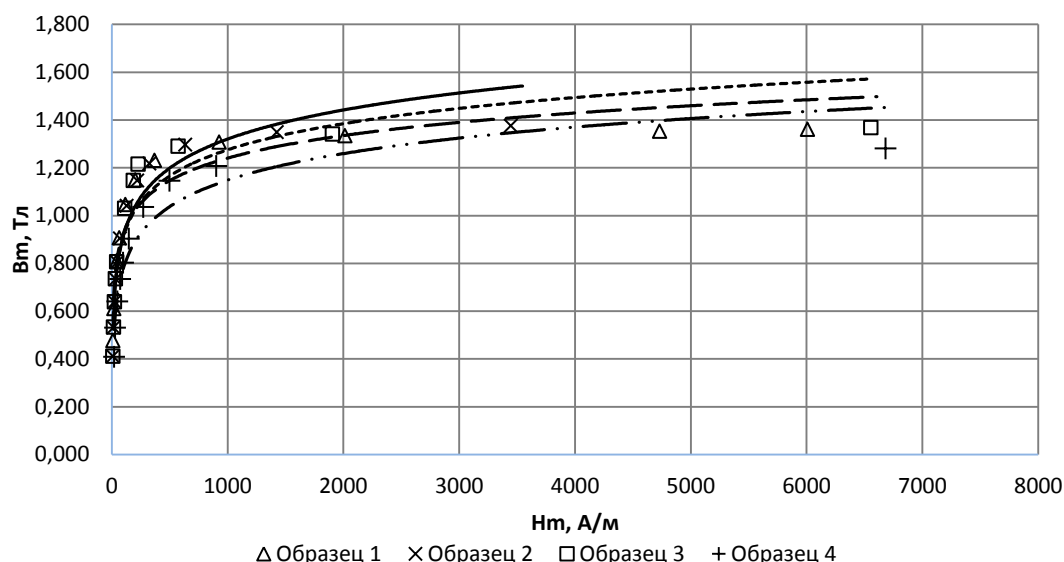


Рис. 3. Характеристики намагничивания четырех образцов при частоте 2 кГц

Так как поток Φ одинаков по всему контуру, это привело к локальным перенасыщениям металла, причем снижение индуктивности насыщения будет прямо пропорционально снижению площади самого узкого поперечного сечения, вызванного разрушением [15]. Образец после вибростенда, напротив, имеет повышенную индукцию насыщения. Это может быть объяснено возникновением незначительных равномерных повреждений, которые образуют домены с повышенной проводимостью магнитного поля.

Для сравнения зависимостей удельных потерь от индукции разных образцов используем линейную аппроксимацию

$$F(x) = a + bx,$$

обеспечивающую наилучшую сходимость. Для первого образца получим аппроксимирующую функцию

$$F(x) = -0,6683 + 2,3567x$$

со средним квадратичным отклонением $\sigma = 0,004$.

На рис. 4 и 5 показаны характеристики потерь в стали четырех образцов при частотах 400 Гц и 2 кГц соответственно.

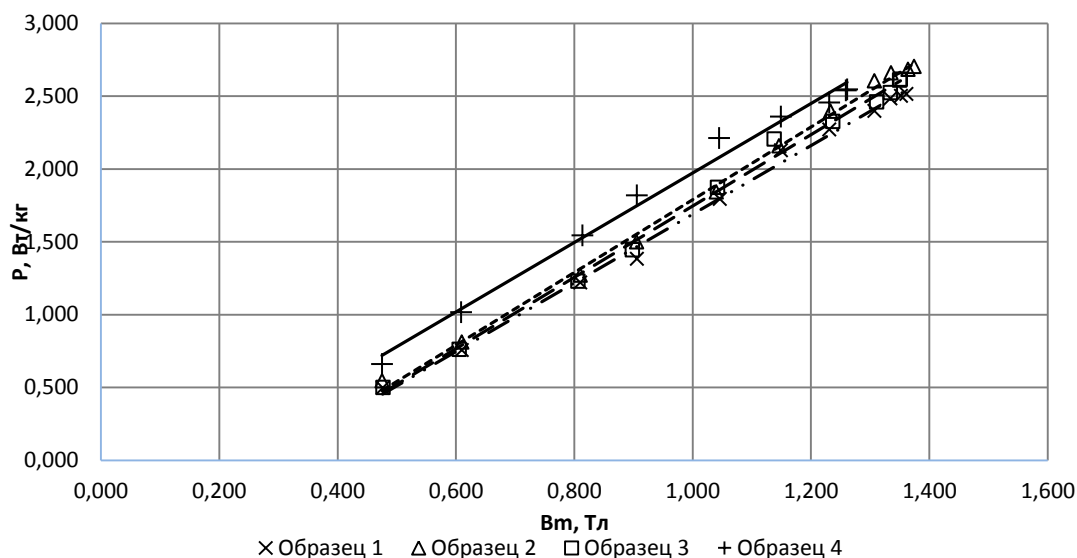


Рис. 4. Характеристики потерь в стали четырех образцов при частоте 400 Гц

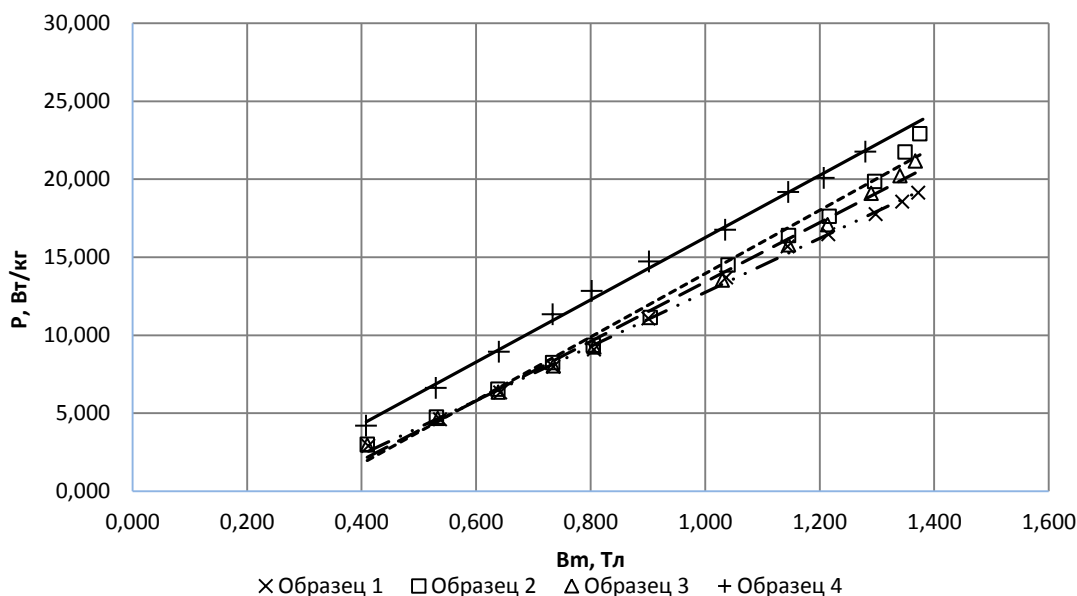


Рис. 5. Характеристики потерь в стали четырех образцов при частоте 2 кГц

На характеристиках потерь в стали воздействие вибрации и сжатие давлением 21 МПа при перенамагничивании вблизи насыщения имеют заметно более высокие значения (порядка 5-10 %). При сжатии 42 МПа возрастание потерь в стали в рабочем режиме достигает 20 % относительно первого образца.

Для сравнения зависимостей проницаемости от индукции разных образцов используем полиномиальную аппроксимацию 4-й степени, показавшую наименьшую

погрешность по методу наименьших квадратов.

Аппроксимирующая функция для первого образца имеет вид

$$F(x) = -33133 x^4 - 168235 x^3 + 315922 x^2 - 288384 x + 117518$$

со средним квадратичным отклонением $\sigma = 0,016$.

На рис. 6 и 7 показаны характеристики проницаемости 4 образцов при частоте 400 Гц и 2 кГц соответственно.

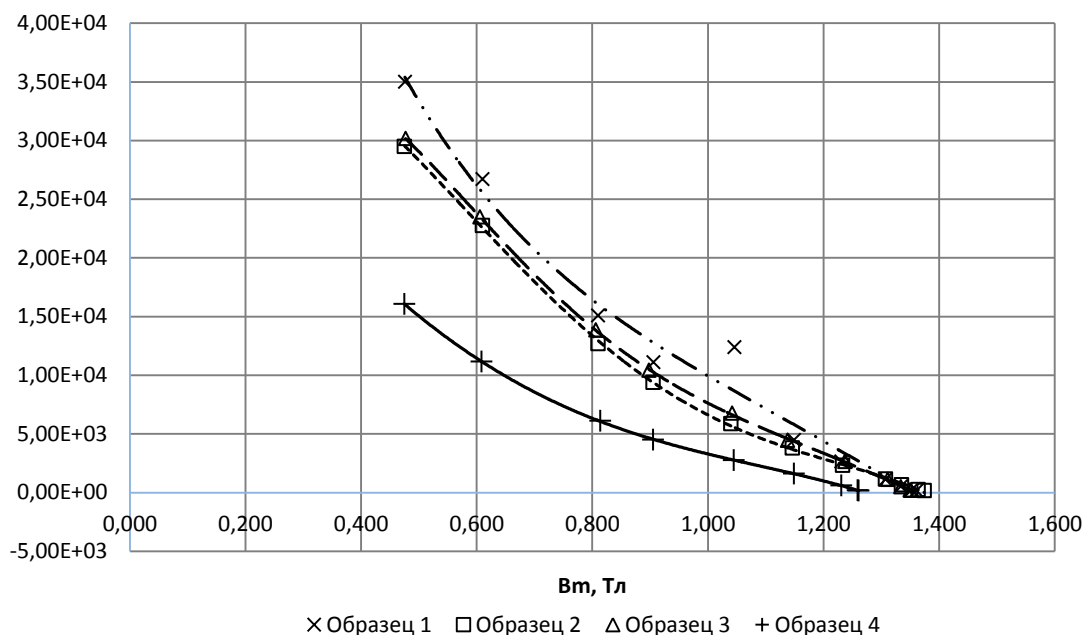


Рис. 6. Характеристики проницаемости четырех образцов при частоте 400 Гц

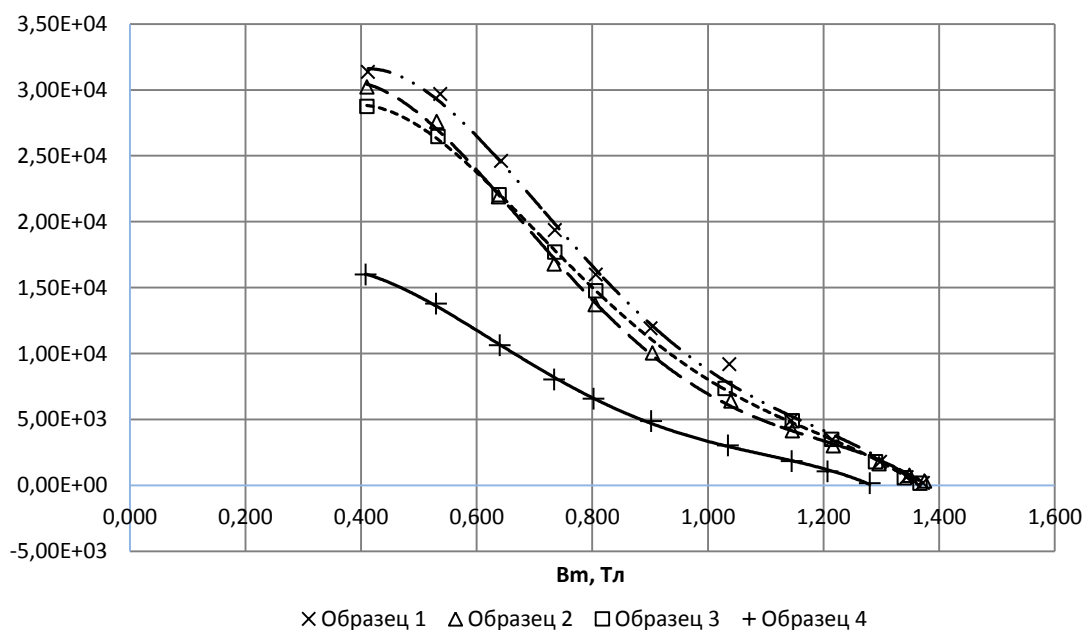


Рис. 7. Характеристики проницаемости четырех образцов при частоте 2 кГц

По рис. 6 и 7 можно сделать вывод, что проницаемость чувствительна к любым механическим воздействиям.

Наибольшей чувствительностью к механическому воздействию обладают такие электромагнитные характеристики стали, как проницаемость и потери на перемагничивание. Среди проведенных испытаний наименьшее воздействие оказало сжатие давлением 21 МПа, последствия которого

заметно отражаются только на проницаемости снижением на 15 % относительно максимальных значений. Большее влияние оказало воздействие вибрации в течение 2 часов, которое снизило некоторые основные электромагнитные характеристики на 5-10 %. Наибольшее влияние оказало сжатие давлением 42 МПа, которое оставило визуально регистрируемые повреждения. Сжатие значительно ухудшило все основные электро-

магнитные характеристики, в некоторых случаях ухудшение достигает 30 %, индукция насыщения снизилась на 10 %.

Как и ожидалось, воздействие вибрации и давления на магнитопровод из аморфной стали приводит к ухудшению его электромагнитных характеристик. Такое влияние необходимо учитывать при проектировании электромагнитных и электромеханических преобразователей. Например, при обработке и установке магнитопровода могут возникнуть локальные напряжения, как при

сжатии, что приведет к ухудшению показателей магнитопровода и преобразователя в целом, вместе с этим воздействия вибрацией могут быть в процессе эксплуатации, влияние которых будет усиливаться со временем.

В статье представлен способ для исследования и анализа влияния различных механических нагрузок на электромагнитные показатели магнитопровода из аморфной стали, дающий возможность получить качественную оценку.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бравичев С.Н.** Математическая модель трансформатора, основанная на моделировании магнитного поля / С.Н. Бравичев, Л.В. Быковская, В.Н. Трубникова // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: труды VII Всерос. науч.-техн. конф. Оренбург: ОГУ, 2014. С. 206-210.
2. Электромагнитные характеристики нового нанокристаллического сплава 5БДСР и возможности его применения в электромагнитных устройствах / В.В. Карасев, В.А. Макаров, А.Е. Филиппов, В.В. Маркин // Электротехника. 1994. № 4. С. 51-56.
3. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах силовых трансформаторов / С.В. Хавроничев, А.Г. Сошинов, В.С. Галушак, Т.В. Копейкина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-4. С. 607-610.
5. **Копылов И.П.** Математическое моделирование энергетических машин: учеб. / И.П. Копылов. М.: Высш. шк., 2001.
6. **Корзунин Г.С.** Современное состояние контроля некоторых магнитных характеристик анизотропной электротехнической стали / Г.С. Корзунин. М.: Дефектоскопия, 2005. 3-7 с.
7. Электродвигатели для гибридных самолетов [Электронный ресурс]. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/663740-aviatsiya-gibrid-elektrodvigatel-ciam-maks>. (дата обращения 27.12.20 г.).
8. Аморфные сплавы и экономия // Энергетика, оборудование, документация [Электронный ресурс]. URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-iekonomiya.html> (дата обращения 28.12.2020).
9. Исследование магнитных свойств и микромагнитной структуры многокомпонентных Fe_{61.4}Ni_{3.6}Cr_{3.2}Si_{2.4}Nb_{7.8}Mn_{3.6}B₁₈ аморфных лент / Е.Е. Шалыгина, Н.М. Абросимова, М.А. Комарова, В.В. Молоканов // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. № 9. С. 127-130.
10. **Zhang T.** Bulk Glassy Alloys in (Fe, Co, Ni)-Si-B System / T. Zhang, A. Inoue // Materials Transactions (Japan). 2001. Vol. 42. № 6. P. 1015-1018.
11. **Гойхенберг Ю.Н.** Структура и магнитные свойства аморфных сплавов в зависимости от степени кристаллизации / Ю.Н. Гойхенберг, В.Е. Рошин, С.И. Ильин // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 14. С. 24-28.
12. **Johnson W.L.** Bulk amorphous metal – An emerging engineering material / W.L. Johnson // JOM. 2002. Vol. 54. Iss. 3. P. 40-43.
13. **Золотухин И.В.** Физические свойства аморфных металлических материалов / И.В. Золотухин. М.: Металлургия, 1986. 176 с.

14. Прочностные и пластические свойства протяженных аморфных проводов из Со-сплава, полученных с использованием различных методов быстрой закалки расплава / И.И. Мохирев, Т.Р. Чуева, В.Т. Заболотный и др. // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 7. С. 31-35.

15. **Кимура Х.** Прочность, пластичность и вязкость – рассмотрение в рамках механики деформации и разрушения / Х. Кимура, Т. Масумото // Аморфные металлические сплавы. М.: Металлургия, 1987. С. 183-228.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета

Vyacheslav E. Vavilov – PhD, Associate Professor, Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University

Минияров Айбулат Халяфович – младший научный сотрудник кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета

Aibulat Kh. Miniyarov – Junior Researcher, Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University

Веселов Алексей Михайлович – аспирант, инженер кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета

Aleksey M. Veselov – Postgraduate, Engineer at the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University

Пермин Данила Юрьевич – магистр, оператор ЭВ и ВМ кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета

Danila Yu. Permin – Master's Degree, Computer Command Engineer, Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University

Пронин Егор Андреевич – магистр 1 курса, оператор ЭВ и ВМ кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета

Egor A. Pronin – Master student, Computer Command Engineer, Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University

Статья поступила в редакцию 19.02.2021, принята к опубликованию 10.03.2021

УДК 621.365.52, 621.785.52

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТОКА ИНДУКТОРА НА ПРОЦЕСС ЦЕМЕНТАЦИИ ТИТАНА В КОНТЕЙНЕРЕ С УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДОЙ

А.В. Войко, А.А. Фомин

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS AND INDUCTOR CURRENT ON TITANIUM CARBURIZATION IN A CONTAINER WITH A CARBON-CONTAINING MEDIUM

A.V. Voyko, A.A. Fomin

В данном исследовании приведены результаты моделирования процесса химико-термической обработки (ХТО) титановых образцов-дисков, располагаемых в контейнере с углеродсодержащей средой. Основными параметрами рассматриваемого процесса выбраны ток индуктора и геометрия системы «индуктор – контейнер – образец», а именно количество витков, высота и внутренний диаметр индуктора при неизменных геометрических параметрах контейнера для ХТО. Рабочая температура внешней поверхности контейнера изменялась в диапазоне от 1100 до 1350 °С, которая достигалась при токе индуктора от 3,4 до 5,0 кА и частоте колебаний 88 ± 2 кГц. Полученные картины распределения температурных полей позволили получить представление об эффективности нагрева индукторов различной конструкции.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, цементация в графите, индукционный нагрев, численное моделирование, температурное поле, кинетика нагрева

The research presents the simulation results of chemical thermal treatment (CTT) of disk-shaped titanium samples located in a container with a carbon-containing medium. The main parameters of the considered process are the inductor current and geometry of the «inductor – container – sample» system, namely, the number of turns, the height and internal diameter of the inductor with unchanged geometric parameters of the container for the CTT. The operating temperature of the external surface of the container ranged from 1100 to 1350 °C, which was achieved at an inductor current from 3.4 to 5.0 kA, and the oscillation frequency of 88 ± 2 kHz. The obtained patterns of the temperature field distribution allowed for gain an insight into the heating efficiency of inductors of various designs.

Keywords: chemical thermal treatment, carburization in graphite, induction heating, numerical simulation, temperature field, heating kinetics

В современной промышленности широко используются различные способы термической обработки заготовок из металлов и сплавов с помощью электрической энергии. К таким способам можно отнести:

1) нагрев в печах сопротивления; 2) нагрев в электродуговых печах; 3) электроконтактный нагрев; 4) радиационный нагрев; 5) электронно-лучевой нагрев; 6) индукционный нагрев [1].

Нагрев деталей в печах сопротивления осуществляется достаточно медленно, затем заготовки выдерживаются в заданном температурном диапазоне, после чего происходит постепенное их охлаждение. К недостаткам такого процесса можно отнести инерционность нагрева и охлаждения камеры печи, а также низкую производительность [2-4].

Разновидностью прямого нагрева является электроконтактный метод [5-7]. Его сущность заключается в пропускании переменного электрического тока через нагреваемое изделие и выделении в поверхностном слое тепловой энергии. К недостаткам данного способа можно отнести ограниченную применимость, которая объясняется меньшей эффективностью нагрева длинномерных и неосесимметричных деталей, а также заготовок сложной формы.

Электродуговые печи позволяют получить более высокую температуру для обработки деталей [8-10]. При этом существует высокая вероятность возникновения значительного температурного градиента в конструкции, что может привести к перегреву ее отдельных элементов. Электронно-лучевой вид нагрева относится к методам нагрева концентрированными потоками энергии, а именно воздействием на поверхность деталей ускоренных электронов в потенциальном поле. Процесс отличается локальностью и высокой скоростью нагрева. Этот процесс имеет также недостатки, заключающиеся в необходимости использовать сложное и дорогостоящее вакуумное оборудование. Данный вид нагрева, как и другие методы обработки концентрированными энергетическими потоками, характеризуется возникновением больших температурных перепадов между поверхностью и внутренней частью изделия [11-13].

Существуют также бесконтактные методы нагрева, в частности нагрев излучением. Материал изделия нагревается при поглощении испускаемой тепловой энергии, например от вольфрамового или нихромового нагревательного элемента. Особенностью данного процесса термообработки является вероятное загрязнение заготовок частицами материала излучателя [14, 15].

Наиболее перспективным методом бесконтактного электронагрева металлоизделий является применение высокочастотных технологий, в частности индукционного нагрева. В основе индукционного нагрева лежит принцип поглощения энергии переменного магнитного поля проводником и выделение в поверхностном слое джоулевого тепла. Широкое использование нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) объясняется скоростью и локальностью нагрева, возможностью автоматизации процесса, а также высокой эффективностью по сравнению с установками косвенного нагрева [16-18]. При нагреве ТВЧ металлов и сплавов протекают сложные процессы, имеющие как стационарный, так и нестационарный характер. Основными факторами, определяющими характер нагрева до заданной температуры, являются электрические (ток индуктора, число витков индуктора и тип их соединения), геометрические (толщина воздушного зазора в системе «индуктор – изделие»), электрофизические (электропроводность и магнитная проницаемость материалов индуктора и нагреваемого изделия) и теплофизические (плотность, теплопроводность, удельная теплоемкость) параметры, а также коэффициенты теплоотдачи при конвективном и радиационном теплообмене с окружающей средой [19].

Свойство магнитной проницаемости является важным при нагреве ТВЧ ферромагнетиков, в частности сталей и сплавов на основе железа, кобальта, никеля и некоторых редкоземельных металлов (лантаноидов) [20]. При температурах 650-700°С магнитная проницаемость меняется слабо, после чего быстро снижается до значения около 1 (для вакуума). Этот процесс перехода ферромагнетика в парамагнетик называется также на эффективности нагрева.

При разработке индукторов необходимо обеспечить максимально возможный электрический КПД. В результате снижается продолжительность нагрева, так как при больших значениях этого показателя растет вероятность образования окалины на обрабатываемой поверхности детали [21].

Контроль температуры и скорости нагрева при индукционной обработке является важным вследствие ряда факторов:

- ограниченный доступ к рабочей зоне для бесконтактного измерения;
- высокие температуры (выше 1200°C) не позволяют применять методику измерения по цветам каления;
- формирование на поверхности нагреваемого материала оксидов, препятствующих определению истинного значения температуры металлической поверхности.

Сложности при определении температуры поверхности отмечаются для металлов и сплавов, которые активно взаимодействуют с кислородом воздуха. К таким металлам относится титан, который при температуре 600°C ускоренно образует оксидную пленку. При этом теплоотдача за счет конвекции с увеличением температуры до 1000°C и более приводит к интенсификации окисления [22].

Одним из вариантов определения температуры может быть использование численных методов решения задачи теплопроводности. При рассмотрении распределенных систем, содержащих несколько элементов и границ раздела, достаточно часто используют метод конечных элементов (МКЭ) [19, 23, 24]. Таким образом, в данном исследовании устанавливается влияние параметров

процесса индукционной обработки на распределение температурного поля в системе «индуктор – контейнер – образец».

Система «контейнер – рабочая среда – образец» состояла из герметичного контейнера 4 и крышки 1, изготовленных из тугоплавкого металла. Внутри контейнера размещался титановый образец 2 в порошковой среде графита 3. Контейнер с загрузкой располагался в индукторе 6, который охлаждался интенсивным потоком воды 7. Между контейнером и индуктором находилась кварцевая трубка 5, которая выполняла функцию тепловой и электрической изоляции, а также атмосфера 8 (рис. 1).

Выбор геометрий индукторов, а именно числа витков, при моделировании проводился из условия необходимого теплового воздействия в зоне расположения углеродосодержащей среды и титанового образца. Для этого контейнер, в зоне которого содержится загрузка, располагался напротив центрального витка индуктора.

В первой геометрической модели индуктор представлял собой двухвитковую спираль из медных трубок диаметром 6,5 мм и большим (6-7 мм) расстоянием между витками (рис. 1 а). На рис. 1 в приведена геометрическая модель с индуктором, у которого один виток из медной трубки диаметром 10 мм.

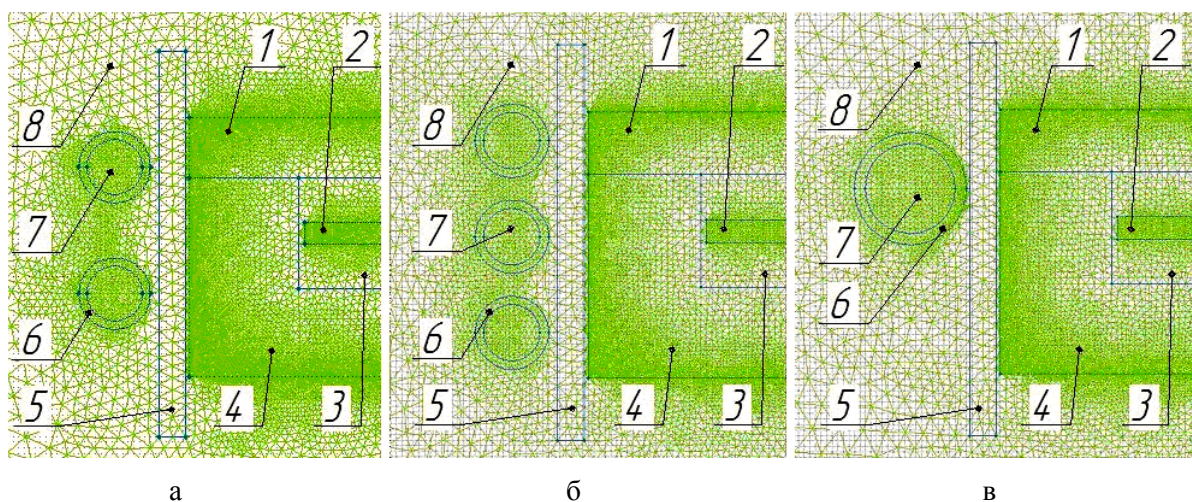


Рис. 1. Геометрические модели (показана левая полуплоскость) системы «контейнер – рабочая среда – образец» с двух- (а), трех- (б) и одновитковыми (в) индукторами:

1 – крышка контейнера, 2 – титановый образец в форме диска, 3 – рабочая среда – графит, 4 – корпус контейнера, 5 – кварцевая трубка, 6 – индуктор, 7 – вода, 8 – атмосфера

Численное моделирование проводилось с применением программы Elcut. Ток индуктора I изменялся в зависимости от геометрии индуктора, что требовалось для достижения рабочей температуры $T = 1100\text{--}1400^\circ\text{C}$ при фиксированной частоте $f = 90$ кГц. Продолжительность компьютерного эксперимента t при моделировании процесса ХТО не превышала 1000 с, что требовалось для достижения рабочей температуры. Стационарная выдержка составила не менее 480 с. Выбранные режимы ХТО соответствовали технологическим параметрам реального эксперимента. Были определены основные параметры системы, а именно распределение тепловыделения Q и температурного поля $T(t)$ в зависимости от тока индуктора I и геометрии системы.

Результаты моделирования показали, что в рассматриваемых моделях системы «контейнер – рабочая среда – образец» максимальное количество тепла Q выделялось во внешнем контуре медной трубки

индуктора. В двухвитковом индукторе тепловыделение достигало $0,85 \times 10^9 \text{ В/м}^3$ и в трехвитковом – $0,92 \times 10^9 \text{ В/м}^3$ (рис. 2). В результате воздействия переменного магнитного поля происходило интенсивное выделение тепла в поверхностном слое (или скин-слое) внешней части контейнера. Эффективная глубина тепловыделения отличалась для каждого случая. В первой модели глубина тепловыделения была несколько больше, чем во второй модели (рис. 2 а, б), при этом Q было практически одинаковое – около $0,15 \times 10^9 \text{ В/м}^3$. Далее, за счет теплопроводности происходил нагрев всего массива контейнера и его загрузки. Выделения тепла во внутренней части контейнера, содержащей рабочую среду и титановый образец, не наблюдалось. Уменьшение количества витков индуктора до $w = 1$ привело к снижению эффективности нагрева поверхности контейнера. Максимальное значение тепловыделения составило $0,027 \times 10^9 \text{ В/м}^3$ (рис. 2 в).

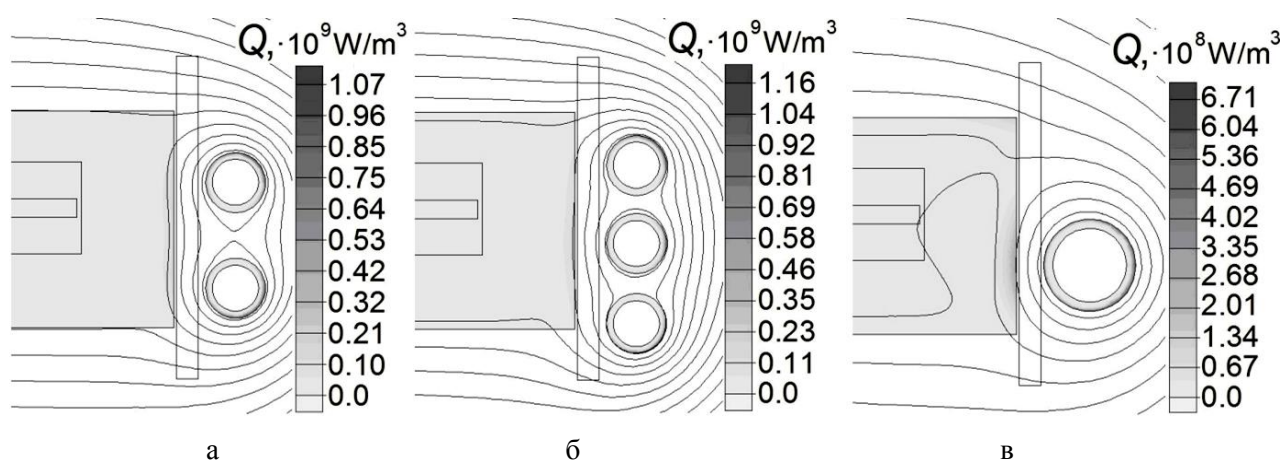


Рис. 2. Картина полей тепловыделения (показана правая полуплоскость) для системы «контейнер – рабочая среда – образец» с двух- (а), трех- (б) и одновитковыми (в) индукторами при токе $I = 3,4$ кА

Оценка влияния геометрии индукторов на нагрев системы «контейнер – рабочая среда – образец» проводилась также на основании картин распределения температурных полей (рис. 3). Полученные картины распределения температурных полей при наименьшем токе $I = 3,4$ кА показали, что равномерность нагрева контейнера обеспечивалась для всех рассматриваемых систем. Температура

в объеме контейнеров была равномерной и достигала 1100°C в конечный момент времени $t = 1000$ с. Однако в модели с индуктором, имеющим один виток, температура в зоне влияния индуктора была выше 1100°C и составляла около 1200°C . Это объясняется высокой плотностью вихревых токов, сконцентрированных на относительно малом участке поверхности.

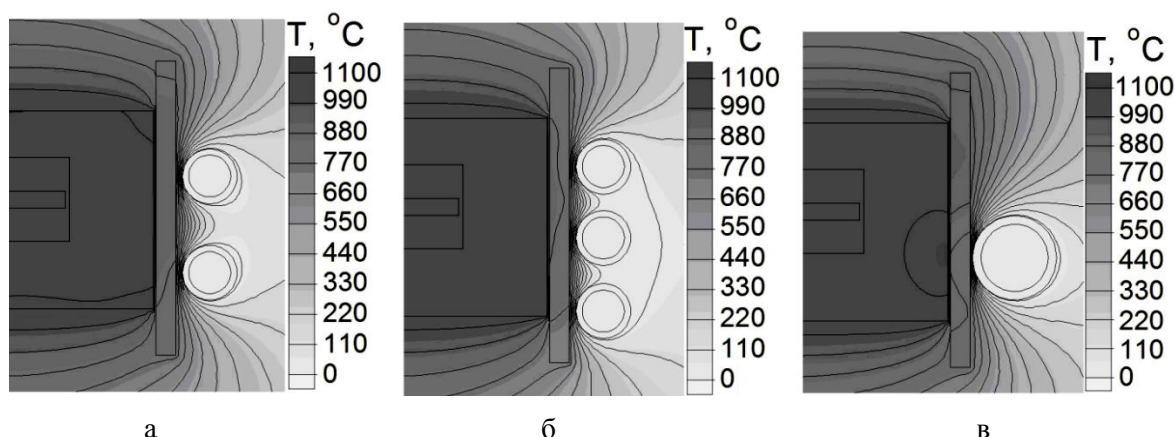


Рис. 3. Картина (показана правая полуплоскость) распределения температурных полей системы «контейнер – рабочая среда – образец» с двух- (а), трех- (б) и одновитковыми (в) индукторами для режимов $I = 3,4$ кА

На основе полученных моделей были получены кинетики нагрева для каждой геометрии индуктора с учетом различных значений тока (рис. 4). Кривые на графике обозначались двумя цифрами: первая указывала номер модели, а вторая – ток индуктора. Для кривых с индуктором из двух витков (кривые 1–1, 1–2, 1–3) вторая цифра указывала ток $I = 3,4$, $I = 4,5$ и $I = 5,0$ кА соответственно. Обозначение кривых с геометрией «2» (трехвитковый индуктор) и «3» (одновитковый индуктор) осуществлялось аналогично.

Изучение кривых кинетики нагрева системы «контейнер – рабочая среда – образец» показало, что температура и скорость нагрева отличались при установлении одинакового значения тока индукторов с различной конфигурацией. В частности, для индуктора с одним витком минимальная скорость нагрева до температуры стационарной выдержки наблюдалась при всех значениях тока индуктора (кривые 3–1, 3–2, 3–3).

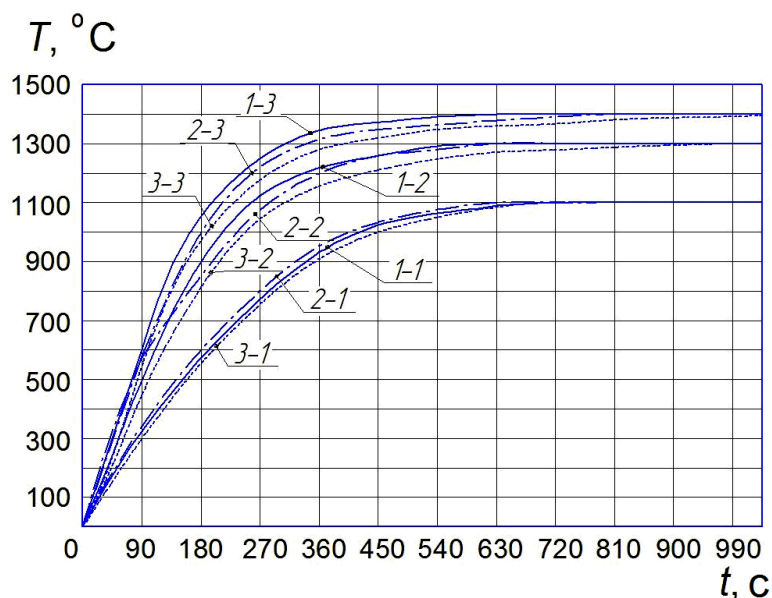


Рис. 4. Кинетика нагрева системы «контейнер – рабочая среда – образец», где цифрами указаны режимы с учетом геометрии и тока индуктора: Индуктор с двумя витками: 1-1 – $I = 3,4$ кА; 1-2 – $I = 4,5$ кА; 1-3 – $I = 5,0$ кА Индуктор с тремя витками: 2-1 – $I = 3,4$ кА; 2-2 – $I = 4,5$ кА; 2-3 – $I = 5,0$ кА Индуктор с одним витком: 3-1 – $I = 3,4$ кА; 3-2 – $I = 4,5$ кА; 3-3 – $I = 5,0$ кА

Для достижения требуемой температуры при токе индуктора $I = 4,5$ кА (кривая 3–2) требовалось t около 900 с, а при увеличении тока до $I = 5,0$ кА выход на требуемую температуру наблюдался при t около 800 с.

Устойчивые результаты моделирования были получены для трехвиткового индуктора (кривые 2-1, 2-2, 2-3). На моделях с разными индукторами при токе $I = 3,4$ кА наиболее эффективный нагрев наблюдается до температуры $T = 1100^\circ\text{C}$ за t около 600 с (кривая 2-1). При токах индуктора $I = 4,5$ кА и $I = 5,0$ кА эффективность нагрева была выше по сравнению с одновитковым индуктором. Скорость выхода на максимальную температуру $T = 1300^\circ\text{C}$ (кривые 2-2 и 2-3) достигалась за $t = 630$ с и $t = 800$ с соответственно.

Наибольшая эффективность индукционного нагрева при токах $I = 4,5$ кА (кривая 1-2) и $I = 5,0$ кА (кривая 1-3) показана для

модели с двухвитковым индуктором. Время нагрева до температуры $T = 1300^\circ\text{C}$ не превышало 560 с и 320 с соответственно.

Таким образом, с помощью моделирования методом конечных элементов в работе были рассмотрены модели нагрева системы «контейнер – рабочая среда – образец». Данный подход позволил показать эффективность индуктора с двумя витками в сравнении с индукторами с тремя и одним витками. На основании полученных моделей распределения полей тепловыделения Q и температуры T при значениях тока $I = 3,4$, $I = 4,5$ и $I = 5,0$ кА сделан вывод о том, что геометрия индуктора оказала существенное влияние на кинетику процесса теплового воздействия для процесса ХТО.

Статья подготовлена в рамках выполнения научных исследований по гранту Российского научного фонда (проект № 18-79-10040).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Горбунов А.С.** Расчет индукторов и экспериментальное исследование индукционных установок с согласующимися трансформаторами / А.С. Горбунов, Л.Э. Рогинская, И.Н. Таназлы // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 26-39.

2. **Пшибис В.А.** Исследование возможности использования Fuzzy-П (ПИ) управление вместо Fuzzy-ПИД в лабораторной муфельной печи СНОЛ / В.А. Пшибис, Н.В. Жукова // Донбасс будущего глазами молодых ученых: сб. материалов науч.-техн. конф. Донецк: Донецк. нац. техн. ун-т, 2019. С. 143-149.

3. **Погребисский М.Я.** Влияние конфигурации нагревателя печи Таммана на равномерность температурного поля / М.Я. Погребисский, Р.А. Гончаренко, В.П. Кондрашов // Технический оппонент. 2019. № 3 (4). С. 38-44.

4. **Харин С.В.** Исследование процессов резистивного нагрева трубопроводов / С.В. Харин, А.Г. Щербинин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротех-

ника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 117-129.

5. **Громов В.В.** Устройство для изотермического деформирования, совмещенного с электроконтактным нагревом / В.В. Громов, С.А. Евсюков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 6. С. 49-57.

6. **Семенченко М.В.** Повышение производительности диффузионного насыщения проволоки путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2018. № 11. С. 78-82.

7. **Семенченко М.В.** Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 32-4. С. 60-61.

8. **Нефедьев С. П.** Перспективы применения плазменной закалки для упрочнения дисковых ножей / С.П. Нефедьев, Р.Р. Де-

ма, Д.А. Котенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Металлургия. 2015. Т. 15. № 1. С. 70-73.

9. **Коротков В.А.** Установка плазменной закалки УДГЗ-200 и результаты ее применения в горном машиностроении / В.А. Коротков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 3. С. 119-125.

10. Опыт разработки и внедрения технологии плазменной закалки прокатных валков ОАО «ЕВРАЗ НТМК» / В.В. Бородин, А.Н. Бородин, Д.В. Безносков, А.А. Бердников // Сталь. 2015. № 5. С. 54-58.

11. Повышение свойств поверхности стали наплавкой и последующей электронно-пучковой обработкой / В.Е. Кормышев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 1. С. 119-125.

12. **Мотасов М.И.** Моделирование процесса нагрева вольфрама в электронно-лучевой установке / М.И. Мотасов, Д.А. Давыдов, В.С. Алексеев // Актуальные вопросы в науке и практике: сб. статей по материалам I Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 31-39.

13. Аналитические характеристики плотности распределения электронного пучка по пятну нагрева для оптимизации процесса электронно-лучевой сварки / С.О. Курашкин, В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин // Сварка в России – 2019: Современное состояние и перспективы: тез. докл. МК, посв. 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона / Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. М., 2019. С. 174-175.

14. **Жевалев О.Ю.** Быстросъемная энергоэффективная система радиационного нагрева для диффузионной сварки / О.Ю. Жевалев, М.А. Приходько, Л.Е. Куц // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 2. № 1 (79). С. 43-46.

15. Пат. 2697535 Российская Федерация, МПК7 C21D 8/00, C21D 1/34, C21D 7/13. Способ частичного радиационного нагрева для изготовления деталей посредством го-

рячей штамповки и устройство для такого изготовления / К. Корошетц, М. Скриккерд, К. Эрикссон; заявитель и патенто-обладатель Оттомейшен, Пресс Энд Тулинг, Ап Энд Т Аб (SE). № 2018116456; заявл. 14.10.16; опубл. 15.08.19, Бюл. 23. 20 с.

16. **Мамаева Д.** Индукционные установки ТВЧ для поверхностной закалки крупномодульных зубчатых колес / Д. Мамаева, Ю. Зинин, Ю. Ройзман // Силовая электроника. 2018. Т. 6. № 75. С. 41-45.

17. **Гурченко П.С.** Перспективы применения углеродистых сталей для подшипников и шестерен с упрочнением управляемой объемно-поверхностной закалкой с индукционного нагрева / П.С. Гурченко, А.А. Соколов // Литье и металлургия. 2015. № 1 (78). С. 91-97.

18. Состояние гомеостаза при имплантации остеофиксаторов с моделированным методом индукционно-термической обработки поверхности / В.В. Деревянченко, А.А. Ряднов, О.В. Терещенко, В.В. Анников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 1 (37). С. 151-155.

19. Влияние процесса окисления и модификации поверхности при обработке токами высокой частоты на кинетику нагрева титана / А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1. С. 73-82.

20. **Бабат Г.И.** Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. 2-е изд., перераб. и доп. М.-Л.: Энергия, 1965. 552 с.

21. **Горбунов А.С.** Влияние частоты тока при индукционном нагреве внешних цилиндрических поверхностей на эффективность процесса нагрева / А.С. Горбунов // Научно-практические исследования. 2020. № 1-2 (24). С. 30-32.

22. Влияние силы тока индуктора на температуру нагрева титановых изделий дисковой и цилиндрической формы / А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1. С. 53-58.

23. Numerical simulation of induction heating of a carburizing container with a titanium sample / A. Voyko, M. Fomina, A. Shumilin et al. // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1124. P. 071021.

24. Numerical simulation of induction heating considering the surface oxidation of cp-Ti samples / A. Fomin, M. Fomina, A. Voyko et al. // J. of Physics: Conf Series. 2017. Vol. 917. P. 082003.

Войко Алексей Владимирович – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомин Александр Александрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия», проректор по науке и инновациям Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey V. Voyko – Postgraduate, Department of Electric Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Assistant Lecturer, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksandr A. Fomin – Dr. Sc., Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Vice Rector for Science and Innovation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.02.2021, принята к опубликованию 09.03.2021

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 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Калгановой С.Г. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла *.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

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 7.1-2003 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. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 26.03.2021
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 10,0 Уч.-изд. л. 4,6
Тираж 500 экз. Заказ 21 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 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 2021 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 26.03.2021
Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print
Conventional printed sheet 10,0 Publication base sheet 4,6
Circulation: 500 printed copies. Order 21 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 dated 1 July 2013*
