

**XIX International Conference  
«Electromechanics, Electrotechnology,  
Electromaterials and Components»  
PROCEEDINGS OF ICEEE-2022**



**XIX Международная Конференция  
«Электромеханика, Электротехнологии,  
Электротехнические Материалы  
и Компоненты»**

**ТРУДЫ МКЭЭЭ-2022**

**27 сентября – 01 октября 2022**

**УДК 621.3**  
**ББК 31.2**  
**Э - 455**

**Труды XIX Международной Конференции «Электротехника, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты». М.: Знак, 2022.**

В книге представлены материалы докладов XIX Международной Конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты» (МКЭЭЭ-2022, 27 сентября – 01 октября 2022 г.)

Книга рассчитана на специалистов в области электроэнергетики и электротехники, инженеров и научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов ВУЗов.

**ISBN 978-5-87789-085-5**

**© Авторы, 2022**

# **ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»

АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS  
(IEEE)

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ВНИИКИ»

НИТУ «МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ»

КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.И.Вернадского

АССОЦИАЦИЯ РАЗРАБОТЧИКОВ, ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ «ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ»

РОССИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕТА ПО БОЛЬШИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ  
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (СИГРЭ)

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОМИТЕТ

**Председатель** – проф. Серебрянников С. (Россия)  
**Заместители председателя** – проф. Бержанский В. (Россия),  
проф. Грузков С. (Россия)

prof. Aleksic S. (Сербия)	проф. Альтов В. (Россия)
prof. Ban D. (Хорватия)	чл.-корр. РАН Бутырин П. (Россия)
prof. Bao-Jun (Китай)	акад. РАН Демирчян К. (Россия)
prof. Cernat M. (Румыния)	проф. Коровкин Н. (Россия)
prof. Fedak V. (Словакия)	проф. Похолков Ю. (Россия)
prof. Halasz C. (Венгрия)	акад. РАН Щербаков И. (Россия)
prof. Jakopovic Z. (Хорватия)	prof. Liese M. (Германия)
prof. Jezernik K. (Словения)	prof. Manfred L. (Германия)
prof. Zhou-Li-Chun (Китай)	prof. Modelski J. (Польша)
prof. Magyar P. (Германия)	prof. Peric N. (Хорватия)
prof. Mietinen O. (Финляндия)	prof. Ruzsanyi T. (Венгрия)
prof. Nagy I. (Венгрия)	prof. Sabanovic A. (Турция)
prof. Rajashekara K. (США)	prof. Yatchev I. (Болгария)
prof. Szymczak P. (Польша)	prof. Utkin V. (США)

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

**Председатель** – Геча В.

**Заместитель председателя** – Казанцев Ю.

Астахов М., Беспалов В., Глушенков В., Захаренко А., Козярук А., Курбатов П., Лилеев А., Мельников А., Мещанов Г., Сарапулов Ф., Славинский А., Слепцов М., Тихонов А., Шулаков Н., Шакирзянов Ф., Халютин С., Благодаров Д.

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

**Председатель** – Кузьмичев В.

**Ученый секретарь** – Крюков К.

**Члены оргкомитета** – Еремцова Л., Новикова Е.

## ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

*Мизин А.И., Теплякова Е.В.*

*Москва, ВЭИ – филиал  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина»*

Мировой рынок электродвигателей быстро растет. По прогнозам аналитиков к 2023 году продажи составят почти 10 млрд. штук. Мало кто об этом задумывается, но они используются практически везде: от компьютеров, холодильников, пылесосов до автомобилей, самолетов и кораблей. Объемы продаж на этом рынке уже сейчас составляют около 200 млрд. долларов и продолжают расти.

В 2016 – 2020 гг. продажи электродвигателей в России выросли на 22 %: с 28,1 до 34,2 млн. шт. Наибольший прирост пришелся на 2017 г., что было обусловлено стабилизацией курса рубля и необходимостью замены давно функционирующих и выходящих из строя электродвигателей, ранее отложенной из-за кризисных явлений предыдущих лет. В 2018 – 2019 гг. продажи росли не столь значительно. Невысокие темпы прироста объяснялись исчерпанием отложенного спроса, а также стагнацией российской экономики после кризиса. В 2020 г. продажи электродвигателей впервые за пять лет снизились на 3 %, что стало следствием нового экономического кризиса на фоне ослабления рубля и неблагоприятной эпидемиологической обстановки.

Стоит отметить, что электродвигатели, реализуемые на российском рынке, в основном представлены продукцией зарубежных производителей. В 2016 – 2020 гг. импорт превышал объемы российского производства в среднем в 21 раз. Основными поставщиками при этом являлись Китай (в среднем 50 % всего импорта в 2016 – 2020 гг.), Германия (10 % поставок), Швейцария (6 %) и Украина (5 %).

По прогнозам BusinesStat, в 2021 – 2022 г.г. продажи электродвигателей в России продолжат сокращаться на фоне ослабления рубля, снижения доступности кредитных средств и покупательной способности как для населения, так и среди предприятий различных сфер деятельности. В 2023 – 2025 г.г. продажи начнут расти, что станет возможным преимущественно за счет замены выходящих из строя электродвигателей. Ожидается, что в 2025 г. в России будет реализовано 35,2 млн. электродвигателей, что будет выше уровня 2020 г. на 3 %.

Все приведенные данные касаются общего рынка продажи электродвигателей в России как малой мощности от 0,5 до 10 кВт, средней мощности от 10 до 75/100 кВт, так и большой мощности свыше 75/100 кВт. Мы рассмотрим проблемы в производстве электродвигателей большой мощности, относящиеся к категории «Крупные электрические машины».

Во времена СССР маркировка электродвигателей была единой для всех заводов производителей и регламентировалась едиными нормативными документами на все вновь разрабатываемые и изготавливаемые электродвигатели в СССР. До 40 % всей конструкторской документации разрабатывалось в Украине – Инженерный центр СКБ «Укрэлектромаш», Харьковское агрегатное конструкторское бюро, НИПКИ технологии электромашиностроения, СКБ «ГИДРОТУРБОМАШ», Особое конструкторское бюро НПО «ХЭМЗ» и многие другие институты и СКБ .

Харьковский электротехнический завод «Укрэлектромаш» (ХЭЛЗ), "Днепропетровский электро-механический завод», «Промэнергомаш» (Запорожье), Ужгородский завод «Электродвигатель», Красноармейский завод «Электродвигатель», Новокаховский электромашиностроительный завод (НКЭМЗ), «Электромаш» г.Тирасполь (Молдова), Завод «Армэлектромаш» (Ереван), завод «Вольта» (Эстония) и многие другие обеспечивали до 46 – 50 % потребностей рынка крупных электрических машин Советского Союза и в частности России.

Экономический кризис в Украине 90-х годов прошлого столетия заставил многих потребителей промышленного и специального оборудования России обратить свои взгляды на Запад, где заводы и фабрики не только не остановили своего производства, но и с каждым днем продолжали наращивать мощности и совершенствовать технологии.

После прекращения поставок в Россию продукции из Украины на рынке образовался «пробел» в секторе относительно дешевых электро-

двигателей для оборудования ГЭС, ТЭЦ, АЭС, тяговых электродвигателей локомотивов РЖД, судостроения, транспорта, подземного оборудования. В импортозамещении электрических двигателей нуждается и российский метрополитен.

Для решения проблемы импортозамещения Госдумой РФ во втором и третьем чтении был принят закон о промышленной политике, в котором появилась статья, посвященная фондам развития промышленности. По распоряжению правительства РФ 13,5 млрд. рублей было зарезервировано в бюджете на 2015 – 2017 годы на займы под 5 % годовых для проектов импортозамещения на прединвестиционной стадии сроком на 5 – 7 лет [1]. Такая мера стимулировала разработку заводами-изготовителями электродвигателей специальных «импортозамещающих» серий. Например, Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ) получил займ в размере 106,8 млн. рублей на 4 года с процентной ставкой в 5 % для производства импортозамещающих тяговых электродвигателей – ключевого компонента тепловозов, собираемых на заводах ЗАО «Трансмашхолдинг» (в холдинг входит НЭВЗ) в Брянске и Коломне. Целью нового производства является импортозамещение тяговых электродвигателей, производимых в Харькове.

Таким образом, в сложившейся ситуации на отечественном рынке электродвигателей отмечается дефицит определенных серий электродвигателей специального назначения. С запуском программы поддержки импортозамещающих производств в ближайшее время может наметиться тенденция в сторону снижения доли импортной продукции.

В краткой презентации сложно объяснить всю проблему производства крупных электрических машин в России, которая сложилась после распада СССР, поэтому приведем лишь отдельные примеры возможных инвестиций в производство электродвигателей большой мощности для четырех отраслей потребителей КЭМ.

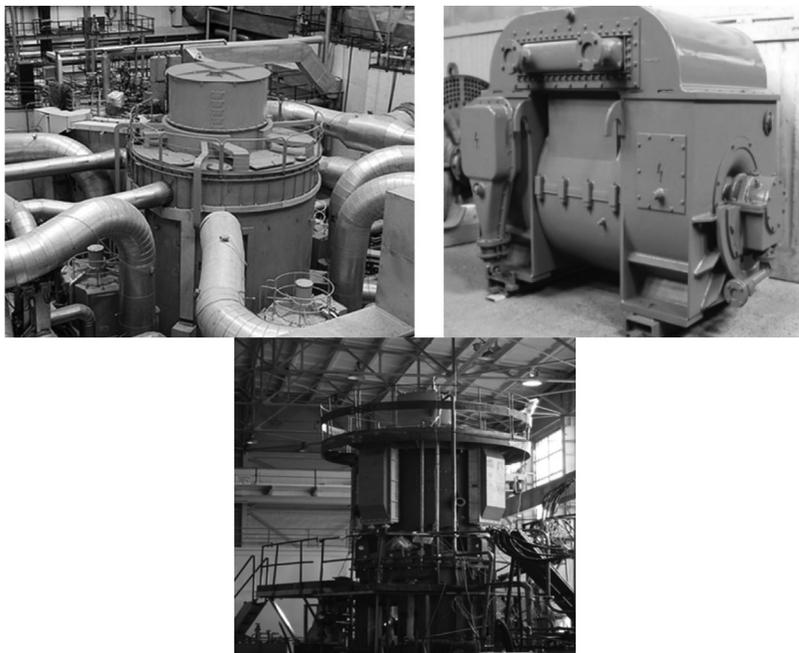
Каждый энерго-блок АЭС имеет в своем составе от 30 до 40 шт. электродвигателей большой мощности разной модификации (ВДА 173, ВА3 215, ВАК 316, АВ-15, 2 АЗМ-800, ДВДА 260, 2АРМ-100, ВАН 143, АОДФ 5-800 и множество других мощностью от 100 до 8000 кВт) в зависимости от типа реактора РБМК-1000, ВВЭР-1000 или прочих. Эти электродвигатели применяются – в главных циркуляционных насосах, насосах аварийного расхолаживания, аварийных и сетевых пи-

тательных насосах, конденсатных насосах первой и второй ступени, сливных насосах, вентиляторах охлаждения и других узлах технологического цикла.

Объем потребления КЭМ предприятиями ВПК и Энергетических Госкорпораций продукции произведенной в России и странах Ближнего и Дальнего зарубежья составляет около 200 – 250 шт./год. Это 2,75 % мирового производства и 10 % объема продаж на международных рынках.

Из-за большой номенклатуры и количества применяемых электродвигателей, основные производители – компания «Русэлпром», завод «Уралэлектро», ОАО «Электромашина», ОАО «Силовые машины», ООО «Электротяжмаш-Привод» и другие, на сегодняшний день уже не справляются с поставленными задачами по своевременной поставке оборудования на возрастающий рынок России в атомной и теплоэнергетике без реконструкции и переоснащения своих предприятий или строительства новых заводов по производству КЭМ.

В 2019 году, впервые в истории, ОСК полностью выполнила сдаточную программу по Гособоронзаказу. С 2008 по 2013 год корпорация



**Рис. 1.** Применение КЭМ на АЭС, ТЭС, ТЭЦ и котельных

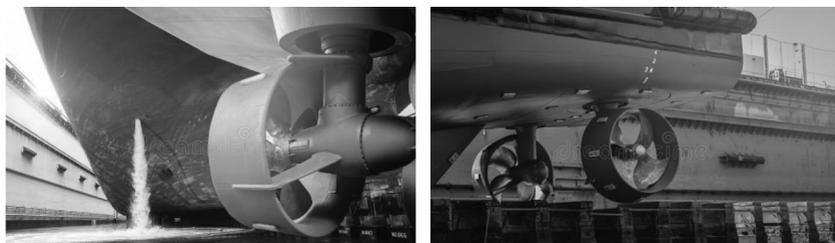
построила 11 и отремонтировала 7 кораблей, с 2014 по 2018 год – 31 и 23 соответственно. Рост составил более чем в два раза. По гражданской тематике рост также впечатляющий. С 2008 по 2013 год корпорация сдала заказчикам 45 гражданских судов, с 2014 по 2018 годы – 66 заказов. Сейчас же на верфях ОСК строятся 73 крупных гражданских судна и около 120 мелких, водоизмещением от 1500 до 4000 тонн.

К сожалению, приходится констатировать тот факт, что основной объем КБ, которые занимаются разработкой рабочей-конструкторской документации для судов, не входят в ОСК. А концепт-проекты так и вовсе на 99 % иностранной разработки с применением комплектующих (в том числе электродвигателей ходовых установок, подруливающих устройств, рулевых колонок, даже устройств сброса и подъема якоря) импортного производства.

Объем потребления предприятиями ВПК и ОСК составляет около 100 – 120 шт./год с увеличением объема в 3 – 4 раза уже к 2025 г. Это 8,5 % мирового производства и 14 % объема продаж на международных рынках.

Компрессорная станция (далее КС) – неотъемлемая и составная часть магистрального нефте-газопровода, обеспечивающая транспорт нефти и газа с помощью энергетического оборудования. КС служит управляющим элементом в комплексе сооружений, входящих в систему магистрального нефте-газопровода. Именно параметры работы станции определяют режим функционирования транспортной магистрали. Компрессорные станции магистральных нефте-газопроводов оборудуются центробежными нагнетателями с приводом от газовых турбин или электродвигателей.

Линейные компрессорные станции устанавливаются на магистральных нефте-газопроводах через 100 – 150 км. На одной линейной подстанции используется, как правило, от 6 до 24 крупных электрических



**Рис. 2.** Применение КЭМ в корпорации ОСК и АТОМФЛОТ

машин (в зависимости от мощности и производительности трубопроводной магистрали). Кроме этого, через каждые 8 – 10 км трубопроводной магистрали устанавливаются маленькие высоко-вольтные подстанции для питания аварийных задвижек, систем контроля, автоматики и телемеханики. Для организации подстанций вдоль магистрали строятся ЛЭП на 6 – 10 кВ и каждая подстанция оснащается в/в трансформаторной КТП, КРУН и ЩО. При проработке вопроса замены в/в подстанций на подстанции КПБУ, на основе встраиваемого в магистральный трубопровод турбогенератора, приводимого в движение потоком нефтяной жидкости или газа, получено положительное заключение от первого вице-президента компании «Роснефть» и технического отдела освоения новой техники ПАО «Газпром» об общей потребности подобных подстанций в количестве около 200 шт. в год.

Объем потребления крупных электрических машин предприятиями добычи, переработки и транспортирования газа и нефти ПАО «Газпром»



**Рис. 3.** Применение КЭМ в ПАО «ГАЗПРОМ» и ПАО «ТРАНСНЕФТЬ»

и ПАО «Роснефть» составляет около 450 – 500 шт./год и является самым перспективным рынком сбыта КЭМ. Это 15 – 17 % мирового производства и около 20 – 22 % объема продаж на международных рынках.

Состав локомотивного парка во многом определяет перевозочные возможности ОАО «РЖД». ОАО «РЖД» по состоянию на начало 2013 года располагало парком в 20 619 локомотивов, причем уже тогда 65 – 70 % локомотивного парка имело срок эксплуатации 30 – 40 лет. По своим масштабам локомотивный парк России уступает в мире лишь США, где на 2010 год на железных дорогах I класса находилось 23 893 локомотива и еще около 4000 машин на второстепенных линиях.

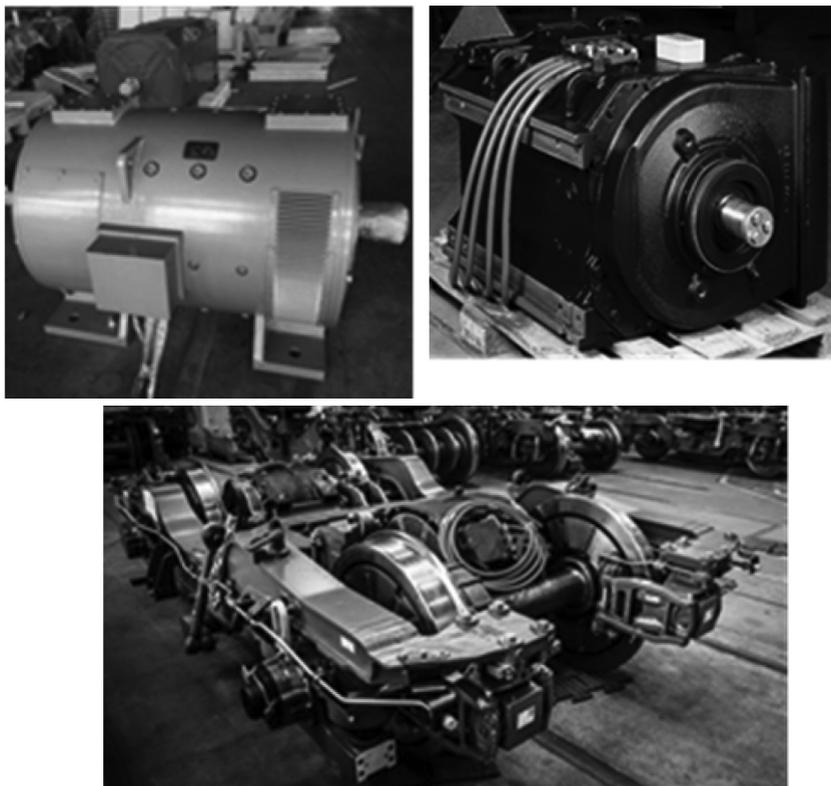
В настоящее время РЖД закупают электровозы постоянного тока 2ЭС4К, 2ЭС6, ЭП2К, 2ЭС10, переменного тока Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К, ЭП1М и ЭП1П. Эксплуатируются также приобретенные в последние годы двухсистемные пассажирские электровозы ЭП10, ЭП20.

Приобретаются магистральные грузовые тепловозы 2ТЭ116У, 2ТЭ25А, 2ТЭ25К и 2ТЭ25КМ, пассажирские ТЭП70БС и ТЭП70У, маневровые ТЭМ18ДМ. В течение 2000-х годов приобретены небольшие партии грузовых тепловозов 2ТЭ70.

Как видим, подавляющее большинство грузовых локомотивов переменного тока – это техника, выпущенная еще в СССР. Хотя в момент начала постройки электровозы и тепловозы были вполне современными локомотивами, к настоящему времени они устарели как морально, так и физически.

Стоит отметить, что большинство грузовых локомотивов переменного тока оснащены тяговыми электродвигателями ЭД 118А, ЭД 133, ЭД 138А, ЭД 139А, ЭД 140, ЭД 147, ЭД 150А, ЭД 153, ЭДП 810, АД 902, АД 903, АД 904, АД 917 производства Харьковского завода «Электротяжмаш» (причем на локомотивы установлены от 4 до 8 электродвигателей в зависимости от марки локомотива и его колесной формулы). Компания РЖД сообщила, что в 2020 году они закупили 566 новых локомотивов и инвестировали в обновление тягового подвижного состава порядка 95 миллиардов рублей, однако подавляющее большинство (до 80 %) тяговых электродвигателей, установленных на локомотивах – КЭМ импортного производства.

Объем потребления КЭМ предприятиями АО «Трансмашхолдинг», АО «Синара-электрические машины», ГК «Ростех», АО «Алмаз-Антей» составит около 3500 шт./год к 2025 году. Это порядка 8,5 % миро-



**Рис. 4.** Применение КЭМ в ОАО «РЖД»

вого производства и 18 % объема продаж на международных рынках.

В заключении следует отметить что в Госкорпорации «Росатом» была разработана «Стратегическая программа производства КЭМ» на базе предприятий, входящих в контур «Росатом» и приглашает к сотрудничеству всех потенциальных партнеров, работающих в данной отрасли машиностроения, заинтересованных в разработке и производстве образцов КЭМ.

#### **Список литературы**

1. **О промышленной политике в Российской Федерации** [Электронный ресурс]: [Федеральный закон от 31.12.2014 N 488-ФЗ].

2. **Анализ рынка электродвигателей в России в 2016 – 2020 г.г, прогноз на 2021 – 2025 г.г.** Федеральная таможенная служба РФ, Таможенный союз ЕАЭС, BusinesStat (дата обращения 08.04.2021) [Электронный ресурс]

3. **Собственная оценка авторов.**

# РЕТРОСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ. АНАЛИЗ, ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

*Васильев Е.Б.*

*Москва, ОАО «ВНИИКП»*

Кабельной промышленности России 143 года. Хотя истоки ее зарождения находятся в конце 18 века. Ход бурному развитию производства кабелей и проводов безусловно дали открытия, сделанные великими учеными: Эдисоном, Яблочковым, Ладыгиным, Теслой и многими-многими другими.

До революции в России существовало 5 кабельных заводов. Рассмотрим этапы становления кабельной промышленности в довоенный период, после войны и в постсоветский период.

Особо важно отметить, что кабельная промышленность в постсоветский период смогла устоять под ударами кризисов, дефолтов и падения производства. В сегодняшние дни кабельная промышленность имеет объемы производства сравнимые, а по отдельным видам кабельной продукции значительно превышающие объемы производства, в Советский период. Направления развития кабельной промышленности в России и за рубежом сравнимы. Мировые объемы производства кабелей и проводов составляют 180 – 200 млрд долларов США в год. В России 7 – 8 млрд долларов США в год. Объем производства кабелей и проводов в Китае – 40 – 50 млрд долларов США в год.

Интересно рассмотреть тенденции развития кабельного производства в мире по странам и номенклатуре.

Рассмотрим тенденции развития кабельной науки и техники за последние 20 – 30 лет.

Россия мало зависит от импорта кабельной продукции, но есть определенная зависимость от импорта материалов или даже от сырьевых компонентов для производства электроизоляционных материалов, а также от импорта приборов, запчастей и оборудования. В докладе подробно рассмотрены импортные поставки кабелей, материалов, оборудования в России. Россия является ведущей страной в мире в области развития кабельной науки и техники. Ее достижения неоднократно отмечались отечественными и зарубежными премиями, а российские

Таблица 1

## Объемы мирового производства кабелей и проводов в период 2000 – 2021 гг.

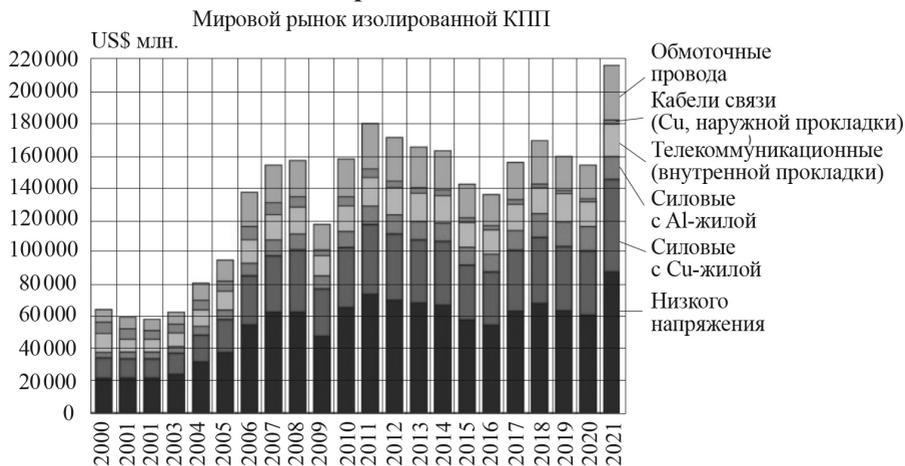
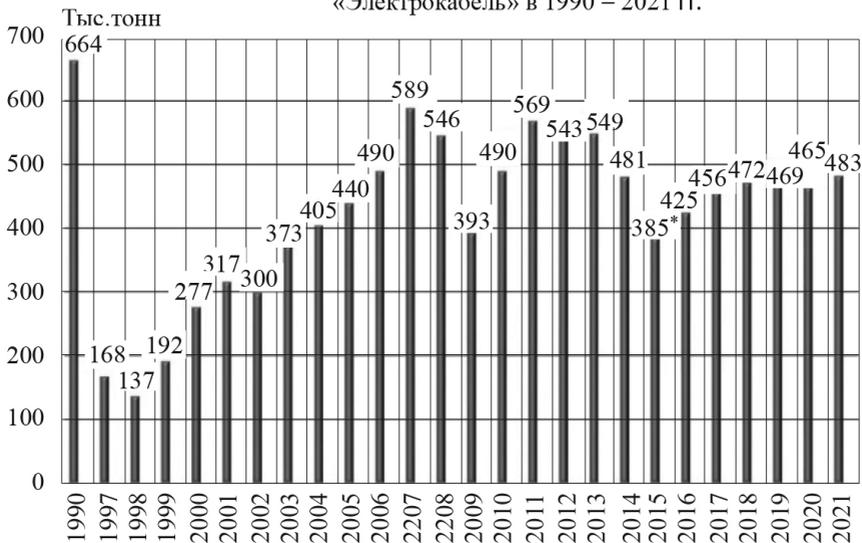


Таблица 2

## Объемы производства кабелей и проводов в период 1990 – 2021 гг.

Динамика объемов выпуска кабельных изделий  
по весу меди на Российских предприятиях ассоциации  
«Электрокабель» в 1990 – 2021 гг.



ученые и специалисты входят в состав международных организаций, комитетов и ассоциаций.

Можно отметить значимые достижения в области сверхпроводимости, фотоники, кабелей высокого и сверхвысокого напряжения. Особое внимание следует уделить созданию кабелей и проводов пожаробезопасного исполнения, которые зародились в начале текущего столетия и имеют тенденцию увеличения объемов производства.

Ведущая роль России принадлежит также в области создания кабелей специального назначения для оборонных отраслей промышленности и специальных видов техники.

## ПРОБЛЕМНАЯ ОБЛАСТЬ И МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

*Кобелев А.С.*

*Владимир, Концерн «РУСЭЛПРОМ»*

### **I. Обобщенная задача промышленного искусственного интеллекта**

Около четверти века назад коллектив авторов, куда входил и автор настоящего доклада, затронул вопрос о перспективах применения методов искусственного интеллекта (ИИ) для решения задач отечественного электромашиностроения [1]. Свежая публикация А.В. Матвеева [2] приглашает к обсуждению проблемы с учетом современного уровня научного направления.

#### *Интеллектуальные системы*

Укрупненно, исследования в области ИИ разделяются на два направления: моделирование деятельности мозга, см. например [3], и решение творческих задач, что опосредованно следует из определения ИИ, представленного в ГОСТ Р 59277 – 2020. Разумеется, далее речь пойдет о втором направлении, которое будем также называть промышленным ИИ.

Важно отметить, что в работах [1, 2 4] ИИ рассматривается как инженерия знаний, т.е. порождение, приобретение, представление и по-

полнение знаний в конкретной предметной области: проектировании электрических машин (ЭМ). Данная предметная область является, так сказать, системной единицей для привлечения искусственного интеллекта. Системной единицей низшего порядка можно считать, например, совокупность знаний по проектированию ЭМ в части обеспечения электромеханических характеристик. В терминах ИИ, при наделении свойствами проактивности, реактивности, автономности, коммуникабельности, подобная программная системная единица называется агентом [5]. Данный агент неизбежно входит в многоагентную систему (МАС) конструкторско-технологической подготовки производства. Последняя – в МАС, описывающую деятельность электротехнического концерна, и т.д. Иерархию МАС и агентов, их, формирующих, в зависимости от проблемы определяет разработчик. Здесь возникают проблемы совместимости/противоречивости локальных целей, наличие взаимных обязательств и ответственности между агентами и МАС различных иерархий, возможность объединения в коалиции, ограниченность ресурсов (программных, аппаратных, материальных, человеческих). Так, повышение энергоэффективности (ЭЭФ) ЭМ чаще всего ведет к ее удорожанию, при этом запрос рынка может как компенсировать, так и не возполнить понесенные дополнительные затраты. Ряд конструкторских решений входит в противоречие с технологическим укладом предприятия, и т.д. Более того, столь крупная МАС, как интеллектуальная модель электротехнического концерна, является лишь элементом техносферы как сообщества разнородных МАС. Примером задачи эффективного взаимодействия крупных разнородных МАС является поиск ответа на вопрос о полезности повышения ЭЭФ ЭМ в контексте повышения ее материалоемкости, которое вынужденно приводит к увеличению добычи меди. А последний процесс весьма энергоемок и неэкологичен.

Таким образом, по нашему мнению, обобщенной/глобальной задачей промышленного ИИ на современном этапе является получение прагматических результатов – полезности, – при моделировании и исследовании сообществ многоагентных систем техносферы, поведение которых определяется отношениями субординации, координации, кооперации, конкуренции, конфликта [6]. Локальные задачи являются частным случаем задачи обобщенной, однако программные структуры, ответственные за результаты локальных задач, должны иметь возможность коммуницировать со смежными МАС. Первая попытка адапти-

ровать часть сказанного применительно к разработке ЭМ была сделана нами в [7].

В заключение данной части важно отметить следующее:

Автор убежден, что существует социальная и мировоззренческая опасность при попытке добиться радикально эффективных результатов моделирования деятельности человеческого мозга, так сказать его полной виртуализации (направление № 1 в ИИ). Вполне можно согласиться с парадигмой промышленной революции (ПР) 4.0, во многом связанной с «интернетом вещей»; далее, принять концепцию ПР 5.0, когда программы для «интернета вещей» создает ИИ, но следует отвергнуть концепт ПР 6.0, когда ИИ будет сам будет решать, что из материально-информационных благ предложить человечеству, и для этого сам начнет ставить и реализовывать соответствующие задачи. Мы надеемся, что в качестве барьера здесь сработает принцип «ограниченной рациональности», введенный Гербертом Саймоном: абсолютная рациональность требует полного знания всех принимаемых решений, что практически недостижимо. Согласимся, что это созвучно теореме Геделя о неполноте<sup>1</sup>.

## **II. Направления и инструментальные средства искусственного интеллекта**

В свете обсуждаемой проблемы выделим 3 важных направления ИИ:

А) *Извлечение знаний* (из неактивных хранилищ; при интервьюировании экспертов и проч.), последующее их релевантное представление и прагматичное использование;

В) *Генерация новых знаний* с применением методов ИИ;

С) *Поддержка принятия* научно-технических, экономических и т.п. решений, основанных на интеллектуальном анализе больших научно-производственных, экономических и других сложных систем.

Простейший пример по направлению А – векторизация конструкторской документации, разработанной на твердых носителях.

Пример сложного извлечения знаний: автоматизированное создание полноценной методики и генерация программного кода на основе

---

<sup>1</sup> Напрашивается еще одна, менее очевидная параллель, из области квантовой механики, а именно принцип неопределенности Гейзенберга: невозможно одновременно с точностью определить координаты и скорость квантовой частицы. В нашем случае, при моделировании мыслительной деятельности, так же присутствует пара характеристик: глубоко декомпозлируемые корпускулы знаний и астрономически большое число (поле) альтернативных исходов при работе с ними.

ИИ – анализа совокупности частичных отчетов по НИР, посвященных созданию того или иного метода расчета. Так, во ВНИПТИЭМ и восприемниках его научной школы (ОАО, ПАО, ООО НИПТИЭМ) было потрачено немало сил для разработки методики расчета добавочных потерь в ЭМ. А в сотрудничестве с ХАИ (г. Харьков) и УкрНИИВЭ (г. Донецк) – методик теплового и аэродинамического расчета. Этих входных данных, в принципе, достаточно, чтобы ИИ сгенерировал полноценные методики и программы по совокупности отчетов с учетом всех ценных данных и знаний, несмотря на их «зашумленность» (см. ниже замечание о «не факторах»). Решение предложенной задачи, – это «завтра» ИИ, однако работы в области интеллектуальной поддержки программирования интенсивно ведутся [8].

Пример направления В). К генерации новых знаний на основе анализа массива имеющихся данных можно отнести результаты факторного анализа, выполненного на базе искусственных нейронных сетей [9], минуя традиционные методы планирования эксперимента.

Направления А) и В) объединяются понятием *data mining*.

Существенно, что ИИ позволяет работать с данными и знаниями, для которых характерны «не факторы»: нечеткость, неточность, недоопределенность, неполнота, неоднозначность [10]. «Не факторы» весьма характерны для электромеханики: это и неточность методик расчета, вызванная допущениями, неточность измерительных приборов, несовершенная технология изготовления (что математически можно свести к нечеткости), недоопределенность данных в виду ограниченного числа экспериментов, неполного построения рядов типоразмеров и др.

По мнению автора, направление С) – создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР), основанных на анализе больших систем, – ключевая задача промышленного ИИ на уровне обеспечения интересов научно-производственных объединений. В принципе, *data mining* – чаще всего служебное/подчиненное направление для реализации ИСППР.

Заметим, что создание ИСППР является одной из подзадач обобщенной задачи ИИ.

Среди методов ИИ, в контексте обсуждаемой темы, выделим следующие:

- методы и средства разработки баз знаний, включая способы представления знаний (модели формальной логики, продукционные моде-

ли, семантические сети, фреймы, онтологические структуры);

- искусственные нейронные сети, а так же построенные на них технологии машинного обучения<sup>2</sup>, включая современные исследования в области глубокого обучения *Deep Learning* [11];
- ряд разделов дискретной математики (современная теория множеств, нечеткая и интервальная математика);
- биоинспирированные алгоритмы поиска оптимальных/эффективных решений;
- раздел математики *исследование операций* и, более узко, *теория игр с не противоположными интересами*, коалиционные игры, аппарат которых целесообразно использовать при программировании МАС;
- методы работы с большими данными (*big data*);
- методы ситуационного моделирования;
- методы и средства создания многоагентных систем, в которых активно используются перечисленные выше методы ИИ.

### **III. Ближайшие задачи ИИ в электромеханике и пути решения некоторых из них**

#### *III.1. От общей классификации к онтологиям*

Автор [2] предлагает в качестве первого шага для привлечения методов ИИ в электромеханику полностью пересобрать существующие классификации ЭМ, одновременно уточнив родовые квалификационные признаки.

На наш взгляд, это очень скромный и спорный шаг. Скромный, ибо методы и средства научного направления ИИ достаточно развиты, и большинство из представленных в разделе II направлений могут уже сейчас быть адаптированы, применены и интегрированы в математический аппарат исследователя – электромеханика.

Далее, мы не согласны с тезисом о необходимости «пересборки» классификаций ЭМ. Автор [2] высказывает два критических аргумента:

- 1) В существующих классификациях ЭМ можно найти неточность родовых понятий, в результате чего невозможно однозначно отнести вид к роду;
- 2) В классификациях ЭМ зачастую имеет место пересечение понятий, что для древовидных классификаций некорректно.

---

<sup>2</sup> Не все технологии машинного обучения базируются на искусственных нейронных сетях

Возражения по первому аргументу. Исторически выверенные родовые признаки «род тока», «расположение ротора» и т.д. следует сохранить, но добавить новые гибридные виды и подвиды.

Возражения по второму аргументу. Пересечения понятий можно избежать, если оперировать термином множественность наследования.

Здесь мы должны сделать важный переход от *формальной классификации* (классифицирования)<sup>3</sup>, которая производит деление объема понятия лишь по одному признаку, к значительно более информативному методу, описывающему различные области знаний в терминах понятий, свойств понятий, их мер и отношений между ними, а именно – к *онтологиям инженерных знаний*. В настоящее время онтологии признаны наиболее эффективным средством формализации и систематизации знаний и данных в научных предметных областях.

Новые родовые свойства (атрибуты), введенные в [2], например, «*признак по движению активных частей и типу передачи энергии на эти активные части*», действительно интересны для изобретателей, и так же должны быть описаны в онтологии.

В методах инженерии технических знаний онтологию, детально и непротиворечиво специфицирующую предметную область, можно представить следующим кортежем:

$$\mathbf{O}^d = \langle \mathbf{K}, \mathbf{A}, \mathbf{D}, \mathbf{R}, \mathbf{E}, \mathbf{F} \rangle,$$

где  $\mathbf{K} = \{Ki | i = 1, 2, \dots, I\}$  – множество классов (концептов, понятий), охватываемых онтологией;

$\mathbf{A} = \{Ai | i = 1, 2, \dots, I\}$  – множество подмножеств атрибутов классов;

$\mathbf{Ai} = \{Aij | j = 1, 2, \dots, J\}$  – множество атрибутов с количеством  $J$ , описывающих  $i$ -й класс, т.е.  $Aij$  –  $j$ -й атрибут  $i$ -го класса;

$\mathbf{D} = \{Dij | i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J\}$  множество подмножеств допустимых значений и ограничений, накладываемых на атрибуты классов;

$\mathbf{Di} = \{Dijn | j = 1, 2, \dots, J, n = 1, 2, \dots, N\}$  множество подмножеств допустимых значений и ограничений, накладываемых на атрибуты  $i$ -го класса;

$\mathbf{Dij} = \{Dijn | n = 1, 2, \dots, N\}$  множество допустимых значений и ограничений, накладываемых на атрибут  $j$   $i$ -го класса, т.е.  $Dijn$   $n$ -е ограничение для  $j$ -го атрибута  $i$ -го класса;

---

<sup>3</sup> Разумеется, базовые классификации, представленные в фундаментальных руководствах [12], безусловно полезны в учебно-методическом плане и актуальны

**R** – конечное множество отношений (связей) между классами ПрО;

**E** – множество экземпляров классов онтологии;

**F** – конечное множество функций интерпретации (множество аксиом, утверждений, построенных из этих понятий, их свойств и связей между ними). Под аксиомой понимается утверждение, вводимое в онтологию в готовом виде, из которого могут быть выведены другие утверждения. Они позволяют выразить ту информацию, которая не может быть отражена в онтологии посредством построения иерархии понятий и установки различных отношений между понятиями.

Множество **R** содержит три типа отношений между классами:

$$\mathbf{R} = \{\mathbf{RI}, \mathbf{RP}, \mathbf{RA}\},$$

**RI** – отношение наследования **Is\_a**;

**RP** – отношение агрегации **Part\_of**;

**RA** – ассоциативные отношения, между концептами. Свойства данных отношений могут быть описаны своими атрибутами.

Пример надкласса/класса/подкласса: электрическая машина/ асинхронная машина/асинхронная машина с короткозамкнутым ротором.

Пример атрибутов для класса *асинхронный двигатель*: *высота оси вращения, число пар полюсов, метод охлаждения*, новые атрибуты, введенные в [2]. Дочерние понятия наследуют атрибуты, входящие в состав родительского понятия, расширяя его состав собственными атрибутами. Онтология поддерживает множественность наследования.

Пример значений атрибута *метод охлаждения*: IC410, IC411, IC416.

Пример экземпляра класса: *7AVER160M4ie2*.

Пример аксиомы: на АЭД с КЗ ротором,  $2p > 8$ , не распространяется деление на классы энергоэффективности.

Для удобства хранения и активного использования знаний, заложенных в научную предметную область *Исследование и разработка ЭМ*, во всех ее аспектах, включая объекты исследования, применяемые методы и результаты, целесообразно оперировать тремя онтологиями:

- собственно онтологией предметной области *Od\_ЭМ* ;
- онтологией применений электрических машин *Oap\_ЭМ* ;
- онтологией проектных задач на классе ЭМ *Ot\_ЭМ*.

Важно отметить, что в отличие от произвольных классификаций, над онтологиями, составленными по согласованным правилам, могут проводиться специальные математические операции (сравнение, интеграция, декомпозиция и др.).

### III.2. От детализированной машинной постоянной к обобщенным типоразмерам

Одной из важных задач при старте проектирования является выбор ближайшего (известного проектировщику) аналога. Если в арсенале КБ или НИИ нужный аналог отсутствует, первым шагом при выборе главных размеров ЭМ является оценка их через машинную постоянную. Критике такого подхода посвящено немало публикаций. Так, в [13] упомянуто, что машинная постоянная не учитывает в явном виде различные требования к энергоэффективности ЭМ. В ней важнейшие показатели:  $A$  (линейная нагрузка),  $B\delta$  представлены в виде произведения. Классическая машинная постоянная не учитывает различия в охлаждении, степени защиты и др. существенных показателей.

Удачная попытка исключить этот недостаток представлена в [14]. Здесь машинная постоянная представлена в виде:

$$C_m \propto K_t K_e K_c K_u K_{fp},$$

где коэффициенты  $K_t$ ,  $K_e$ ,  $K_c$ ,  $K_u$ ,  $K_{fp}$  соответственно учитывают тип ЭМ, требования к КПД, метод охлаждения, уровень напряжения, соотношение частоты и числа пар полюсов. Введение такой постоянной методически оправдано, однако вызывает сомнение удобство ее практического применения. В ней не разделено произведение  $AB\delta$ , а факторы, определяющие главные размеры, далеко не исчерпаны (например, не учтены: степень защиты оболочки, характер нагрузки).

Для разрешения этих противоречий удобно привлечь стандартизованное структурирование ЭМ по высотам оси вращения, методам охлаждения, степени защиты оболочки, классам энергоэффективности и др. Для аккумулирования этих структур, а так же наработанных экспертных знаний мы разработали фреймообразные онтологические таблицы, которые, с одной стороны, несут в себе элементы онтологий, с другой стороны, используют методологию фрейм-концептов, введенных Н.А. Швецовым [15]. Ключевым фактором таковых таблиц является компактность ЭМ. Компактность выбрана потому, что, во-первых, это наглядный показатель, при этом онтологические таблицы внешне напоминают таблицу Менделеева; во-вторых, почти всегда большинство требований технического задания можно перевести в ограничения, а целевой функцией назначить компактность. Повторим, что речь идет о старте проектирования.

Базовой структурой и минимальной интегрированной гранулой зна-

ний в онтологической таблице является *обобщенный типоразмер*, который хранит знания обо всех типоразмерах-аналогах, входящих в контейнер:

$$FOTP = \langle Type, H, Zp, IC, IP \rangle$$

В обобщенном типоразмере отражен факт жесткой стандартизации габаритов по высотам вращения, мощностям и увязкам, что делает наперед известным рациональный диапазон варьирования внешними диаметрами для фиксированной высоты вращения.

Каждая ячейка – контейнер имеет внутреннюю структуру, к которой помимо наследуемых свойств добавляются: *IE* (требования к энергоэффективности), *TR* (степень нормируемости показателей), *Ocl* (класс задачи, как функция  $M = f(n, t)$ ).

Данный подход позволяет активно использовать арсенал знаний организации, указывая исследователю дорожную карту проектирования, базовые стратегии достижения технических показателей.

*III.3. От совокупности программ расчета, взаимодействующих через Framework, к интеллектуальным проектирующим модулям – агентам, объединенным в МАС*

Концепция многоагентной системы поискового проектирования асинхронных двигателей изложена нами в [16]. Здесь лишь отметим, что при создании методов агентов нами применялись такие методы ИИ как семантические сети и продукционная модель представления знаний.

*III.4. От задач локальной оптимизации к задачам многокритериальной оптимизации; к рациональному выбору между «потребностями и возможностями» предприятия*

Эта проблема базируется на объединении результатов работы автономных коммуницирующих агентов головным агентом-интегратором. В частности, агент верхнего уровня может «раздавать» имеющиеся ограниченные ресурсы проекта при согласовании с ЛПР. В терминах теории игр он определяет правила первого хода и последовательность ходов агентов. Лучшая альтернатива выбирается из различных вариантов назначения ресурсов при учете многих разнородных факторов, знания о которых закреплены за автономными агентами.

Для организации ИСППР при управлении процессами промышленных, в т.ч. электротехнических предприятий, перспективной представляется гармонизация идей упомянутых фрейм – концептов [15] и модели сети потребностей и возможностей [17]. Проектирующие агенты стремятся найти оптимальное, в рамках своей компетенции, решение,

а агент – интегратор максимально удовлетворить своим требованиям (т.е. требованиям задачи) в пределах заданных ограничений. При этом в онтологический базис вводится также категория процессов.

*III.5. Исследование прогрессивной эволюции электрических машин с использованием законов биоэволюции и методов ИИ.*

Данная проблема выходит за рамки настоящего доклада. Ее общую формулировку предполагается изложить на Международном конгрессе по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT22.

### **Заключение**

Методы и средства промышленного искусственного интеллекта динамично развиваются и являются мощным подспорьем как в исследовательском проектировании сложных технических изделий, так и при поддержке принятия управленческих решений крупных промышленных предприятий. К сожалению, в столь мощной научной предметной области *Исследование и разработка ЭМ* эти методы пока не получили должного применения.

Первоочередными задачами, где был бы полезен арсенал ИИ, на наш взгляд являются:

- привлечение онтологического подхода для формализации и спецификации электротехнических знаний;
- создание расчетно-конструкторского и технологического программного обеспечения в виде автономных агентов, управляемых целями, коммуницирующих между собой и объединенных в многоагентные системы;
- структурирование управленческих знаний в виде онтологий деятельности предприятия; разработки МАС, агентами которых являются автономные бизнес–единицы, создание ИСППР, поддерживающих исследовательскую, производственную и бизнес деятельность электротехнических концернов;
- решение многокритериальных задач, в том числе задач эффективного распределения ресурсов биоинспирированными методами оптимизации и методами кооперативных игр с не противоположными интересами.

Методология многоагентного проектирования электрических машин, использующая онтологические базы знаний, является мощным фактором улучшения качества проектирования, снижения себестоимости и сроков ЖЦ конструирования, аккумуляирования и активного многократ-

ного использования проектных знаний. Сам процесс проектирования движется от «автоматизированного» к «автоматическому».

### Список литературы

1. **Евгеньев Г.Б., Кобелев А.С., Кузьмин Б.В., Крючков А.А.** Перспективы использования новой технологии автоматизированного решения инженерных задач для проектирования электрических машин // Электротехника. 1999. № 11.
2. **Матвеев А.В.** Классификация электрических машин для изобретателей и искусственного интеллекта // Электричество. 2022. № 6.
3. **Базян А.С.** Интеграция высших функций мозга, как основа когнитивности // Успехи физиологических наук. 2016. Т. 47. № 3.
4. **Евгеньев Г.Б., Кобелев А.С.** Особенности создания многоагентной системы интеллектуального проектирования электрических машин / Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'16). Т. I. Таганрог: Изд-во ЮФУ. 2016.
5. **Бугайченко Д.Ю., Соловьев И.П.** Абстрактная архитектура интеллектуального агента и методы ее реализации // Системное программирование. 2005. № 1.
6. **Тарасов В.Б.** От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС. 2002.
7. **Кобелев А.С.** Формы и интенсивность взаимодействия между агентами в интеллектуальной САПР АЭД // Электричество. 2007. № 1.
8. <https://github.com/features/copilot/> Дата обращения: 22.07.2022.
9. **Шонин В.А.** Автокорреляционная нейронная сеть факторного анализа // Математические структуры и моделирование. 2018. № 3.
10. **Нариньяни А. С.** HE-факторы: краткое введение // Новости ИИ. 2004. № 2.
11. **Shuhei Doi, Hidenori Sasaki, Hajime Igarashi.** Multi-Objective Topology Optimization of Rotating Machines Using Deep Learning // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 55. № 6. DOI:10.1109/TMAG.2019.2899934.
12. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. Т.1. М.: Издательский дом МЭИ, 2004.
13. **Кобелев А.С.** Возможность использования машинных постоянных при создании энергоэффективных серий асинхронных двигателей / Труды XVМеждународ. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехниче-

ские материалы и компоненты» (ISSEE – 2014). Крым, Алушта, 2014.

14. **Матвеев А.В.** Анализ типов и серий асинхронных машин на основе альтернативной машинной постоянной // *Электричество*. 2020. № 7.

15. **Швецов А.Н.** Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Дис... докт. техн. наук. М.: РГБ, 2005.

16. **Кобелев А.С.** Модели агентов интеллектуальной системы поискового проектирования электрических машин / Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT'17). Т. I. Таганрог: Изд-во Ступина С.А, 2017.

17. **Скобелев П.О.** Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений. Дис... докт. техн. наук. М.: РГБ, 2003.

## ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ

### МЕТОД РЕЛЕЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ В СЕТЕВОМ РЕГУЛЯТОРЕ

*Киселев М.Г., Лепанов М.Г., Церковский Ю.Б., Соломатин А.В.,*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Сетевые регуляторы применяются в качестве устройств повышения качества электроэнергии (компенсация реактивной мощности, активная фильтрация, симметрирование токов и др.), устройств для отдачи активной мощности от нетрадиционных источников энергии (ФЭП, химический источник энергии) и накопления энергии (кинетический накопитель, индуктивный накопитель и др.) [1].

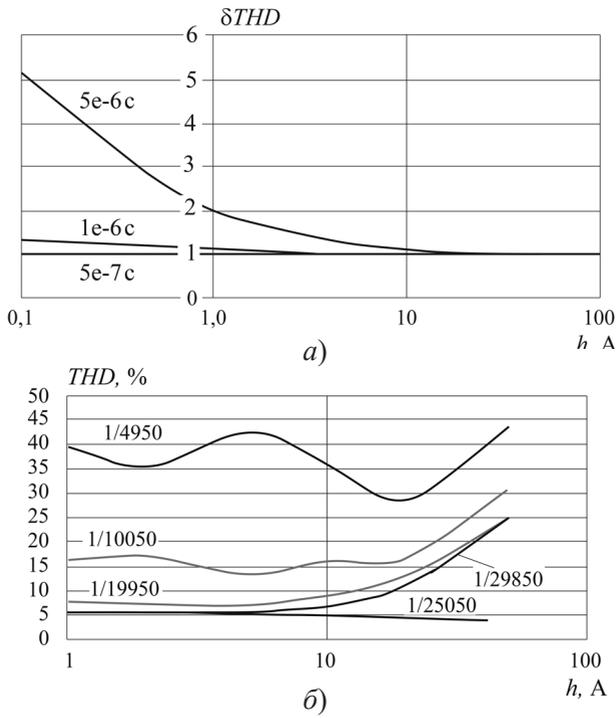
Сетевой регулятор управляет потоками активных и неактивных мощностей, формируя ток на выходе преобразователя регулятора, поэтому в системе управления (СУ) регулятора требуется обратная связь по току.

Одними из основных методов реализации алгоритма управления являются применение ШИМ модуляции или релейной модуляции. Система управления с ШИМ-модуляцией имеет главное достоинство – постоянная частота коммутации ключей преобразователя. Релейный способ модуляции имеет переменную частоту коммутации, однако реализация

алгоритма системы управления проще и управление током регулятора происходит напрямую, что позволяет повысить скорость работы СУ при переходе из одного режима в другой.

При моделировании сетевого регулятора с релейной модуляцией на качество тока регулятора ( $THD$ ) необходимо обратить внимание на шаг расчета модели  $T_s$ , так как при малых значениях ширины петли гистерезиса увеличивается частота переключения ключей. На рис. 1,а показаны зависимости относительных значений  $THD$  при изменении ширины петли гистерезиса для трех значений шагов расчета  $T_s$ . Из графика ясно, что при выборе шага расчета  $T_s = 1e-6$  с получится достаточная точность, которая соблюдается при ширине петли гистерезиса до 1 А ( $THD$  порядка 0,5 %).

При реализации системы управления с релейной модуляцией на основе микроконтроллера СУ является дискретной, и соответственно, в



**Рис. 1.** Зависимость относительного  $THD$  тока регулятора от ширины петли гистерезиса (а) и зависимость  $THD$  тока регулятора от ширины петли гистерезиса при разных  $T_{cy}$  (б)

контуре управления образуется дискретный шаг  $T_{\text{СУ}}$ , с которым вычисляются сигналы управления ключами. При реализации системы управления с ШИМ ТСУ привязывается к частоте коммутации ( $T_{\text{СУ}} = 1/f_{\text{pwm}}$ ). При релейной модуляции  $T_{\text{СУ}}$  зависит от мощности процессора, скорости вычисления сигналов управления и предельной частоты коммутации ключей. Введем  $T_{\text{СУ}}$  в СУ и проведем расчет модели регулятора. На рисунке 1,б показаны характеристики при разных  $T_{\text{СУ}}$  при  $T_s = 1\text{e-}6$  с. Ширина петли гистерезиса построена в логарифмической шкале.

Из характеристик видно, что при релейной модуляции можно достигнуть THD около 5 % только при ТСУ порядка  $5\text{e-}5$  с, средняя частота коммутации достигает 3,5 кГц, максимальная – 15 кГц. Качество тока регулятора сильно зависит от ТСУ. Анализ также показал, что при уменьшении ширины петли  $h$  менее 10 А THD тока практически не меняется. Максимальная частота переключения соответствует  $1/(2 \cdot T_s = 1\text{e-}6)$ .

#### Список литературы

1. Розанов Ю.К., Лепанов М.Г., Крюков К.В., Киселев М.Г. Силовая электроника для управления качеством электрической энергии. Lambert Academic Publishing (LAP), 2015.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ДУГЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ НИЗКОВОЛЬТНОГО ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА

*Верхола А.В.*

*Алчевск, ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»*

Количество энергии, выделяющейся в дуге отключения, является определяющим фактором протекания многих процессов в контактных и дугогасительных системах электрических аппаратов.

Практически весь комплекс физических явлений, имеющих место при горении дуги отключения, можно отнести к нежелательным последствиям размыкания контактов: эрозия контактов, дополнительный нагрев токоведущего контура, безвозвратные потери электроэнергии,

излучение в ультрафиолетовом диапазоне, генерирование электромагнитных помех, генерирование коммутационных перенапряжений, акустический шум, выброс агрессивных и токсичных соединений и другие.

Единственным физическим процессом, который сопровождает горение дуги в контактных электрических аппаратах и оценивается как положительный, является рассеивание энергии, накопленной в отключаемом контуре. При протекании тока  $i$  по контуру, содержащему индуктивность  $L$ , в нём накапливается электромагнитная энергия

$$W_{\text{ЭМ}} = \frac{L \cdot i^2}{2}. \quad (1)$$

Чем быстрее при коммутации обрывается ток, тем большая часть накопленной электромагнитной энергии преобразуется в энергию электростатического поля

$$W_{\text{ЭС}} = \frac{C \cdot U^2}{2}. \quad (2)$$

В результате, ёмкость контура  $C$ , которая образована проводниками и разделяющей их электрической изоляцией, оказывается под воздействием напряжения  $U$ , которое тем больше, чем бóльшая часть электромагнитной энергии  $W_{\text{ЭМ}}$  оказалась преобразованной в электростатическую энергию  $W_{\text{ЭС}}$  [1]. Если отсутствие значительных коммутационных перенапряжений  $U$  является приоритетным по отношению к сопровождающим горение дуги негативным явлениям, то электрический аппарат с бóльшим временем горения дуги может в эксплуатации оказаться предпочтительнее аппарата с меньшим временем горения дуги [2].

Выполненными ранее исследованиями установлено, что дуговая эрозия и износ электрических контактов тесно связаны с количеством выделяющейся в межконтактном промежутке энергии [3].

Для контакторов серий КТ 6400 и КТП 6000 достаточно подробная технико-экономическая оценка потерь электрической энергии в дуге отключения приведена в исследовании, посвящённом разработке гибридных электрических аппаратов [4]. Эта информация остаётся актуальной даже спустя несколько десятилетий, так как контакторы этих серий продолжают находиться в эксплуатации. Вместе с тем, за прошедшее время разработаны и получили широкое распространение новые типы

контакторов, например, с гашением дуги в вакууме. Для них подобные исследования не проводились.

Таким образом, несмотря на то, что вопросам энерговыделения в дуге отключения, посвящено большое количество исследований, проблемы, связанные с этим явлением, нельзя считать решёнными. Универсальные зависимости, пригодные, для любого типа электрического аппарата и коммутируемого им контура, пока не получены. Расширяющееся многообразие коммутационных аппаратов, появление новых контактных и изоляционных материалов, изменение условий эксплуатации ставят новые задачи перед проектировщиками и исследователями.

Целью проводимого исследования является установление зависимости количества энергии, выделяющейся в дуге отключения низковольтного вакуумного контактора, от различных факторов.

Исследования проводились на низковольтном вакуумном контакторе при разных отключаемых токах, разном сдвиге фаз между током и напряжением и разных фазах размыкания контактов. С помощью цифрового осциллографа Micsig STO 1104С фиксировались кривые тока и напряжения дуги отключения (рис. 1). Значения энергии, выделяющейся в дуге, были определены интегрированием по осциллограммам:

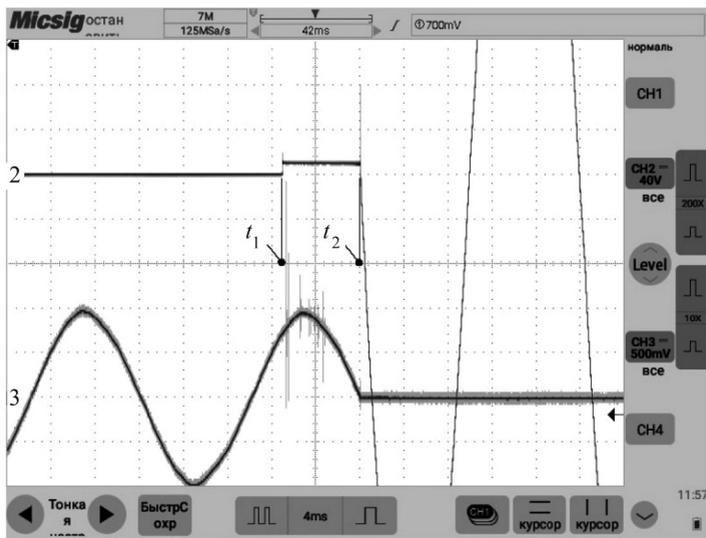
$$W_{\text{д}} = \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{д}} \cdot i_{\text{д}} dt, \quad (3)$$

где  $U_{\text{д}}$  – напряжение на дуге;  $i_{\text{д}}$  – ток в дуге;  $t_1$  – момент размыкания контактов и зажигания дуги (рис.1);  $t_2$  – момент погасания дуги (рис. 1).

В результате проведенных исследований установлены зависимости количества энергии, выделяющейся в дуге отключения, от величины тока, индуктивности отключаемой цепи и фазы размыкания контактов.

Полученные результаты планируется использовать для построения и уточнения математических моделей, описывающих процессы:

- дуговой эрозии контактов вакуумной дугогасительной камеры;
- генерирования коммутационных перенапряжений;
- теплового режима работы вакуумной дугогасительной камеры в различных режимах эксплуатации;



**Рис. 1.** Осциллограммы напряжения и тока дуги отключения: маркером 2 отмечен нулевой уровень напряжения, а маркером 3 – нулевой уровень тока.

- потеря электроэнергии (для экономической оценки эксплуатационных характеристик разных контакторов при их сравнении).

### Список литературы

1. **Воздвиженский В.А., Гончаров А.Ф., Козлов В.Б. и др.** Под ред. В.Б. Козлова. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. **Верхола А.В.** Определение экономически обоснованных параметров синхронного отключения при коммутации низковольтной цепи синхронным вакуумным контактором // Электротехника и электромеханика. 2014. № 2.
3. **Кобайн Дж., Эккер Г., Фаррел Дж. и др.** Под ред. Дж. Лафферти. Вакуумные дуги. М.: Мир, 1982.
4. **Могилевский Г.В.** Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986.

# ПАРАМЕТРЫ СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ЯДЕР $^{57}\text{Fe}$ В КРИСТАЛЛАХ $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x\text{VO}_3$

*Снегирёв Н.И.<sup>а</sup>, Старчиков С.С.<sup>а</sup>, Любутин И.С.<sup>а</sup>, Чуев М.А.<sup>б</sup>,  
Ягунов С.В.<sup>с</sup> и Стругацкий М.Б.<sup>с</sup>*

<sup>а</sup>Москва, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

<sup>б</sup>Москва Физико-технологический институт  
им. К.А. Валиева РАН, Москва,

<sup>с</sup>ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

Бораты железа  $\text{FeVO}_3$  и галлия  $\text{GaVO}_3$  имеют одинаковую кристаллическую структуру и могут образовать непрерывный ряд твердых растворов замещения  $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x\text{VO}_3$  [1]. В настоящей работе методом мёссбауэровской спектроскопии определены значения параметров сверхтонкого магнитного и электрического взаимодействия в монокристаллах бората железа  $\text{FeVO}_3$  и изоструктурного ему твердого раствора  $\text{Fe}_{0,91}\text{Ga}_{0,09}\text{VO}_3$ . Установлено, что в отличие от кристалла  $\text{FeVO}_3$ , спектры которого описываются единственной компонентой, спектры  $\text{Fe}_{0,91}\text{Ga}_{0,09}\text{VO}_3$  представляют собой суперпозицию компонент с различными значениями параметров сверхтонкого взаимодействия и различными площадями, которые соответствуют неэквивалентным окружениям атомов железа атомами Fe и/или Ga. Относительная ширина распределения вероятностей сверхтонких магнитных полей в кристаллах возрастает с увеличением температуры. Это означает, что при низких температурах спектры  $\text{Fe}_{0,91}\text{Ga}_{0,09}\text{VO}_3$  близки к форме секстета с узкими резонансными линиями. При высоких температурах в спектрах  $\text{Fe}_{0,91}\text{Ga}_{0,09}\text{VO}_3$  наблюдается хорошо разрешенная дополнительная компонента. Это связано с большей чувствительностью к тепловым возмущениям магнитных моментов тех атомов железа, в ближайшем окружении которых имеются диамагнитные атомы галлия. Таким образом, установлено, что даже небольшая концентрация Ga ведет к существенному изменению сверхтонкой структуры ядер  $^{57}\text{Fe}$  в  $\text{FeVO}_3$ , что выражается в появлении дополнительных компонент и сложной температурной зависимости мёссбауэровских спектров монокристалла  $\text{Fe}_{0,91}\text{Ga}_{0,09}\text{VO}_3$ .

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-29-12016-мк, в части подготовки кристаллических образцов, мёссбауэровских исследований и теоретического анализа. Рентгенофлуоресцентные измерения проведены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» с использованием оборудования ЦКП.

#### **Список литературы**

1. E. S. Smirnova et. al. Acta Crystallogr. B. 76 (6).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ МАГНИТНОГО НАСЫЩЕНИЯ И ПОТЕРЬ В СТАЛИ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATLAB/SIMULINK**

***Журов И.О.***

*Москва, ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром»*

Асинхронная машина (АМ), являющаяся объектом управления и составной частью электропривода различных электромеханических систем, представляет собой нелинейный нестационарный объект. Для исследования электромагнитных и (или) электромеханических процессов в электроприводе, а также для анализа и синтеза систем управления в настоящее время широко используется метод математического моделирования с применением современных пакетов прикладных программ, среди которых наиболее известен MATLAB/Simulink.

Для того чтобы несколько приблизить модель АМ к реальной машине, следует учитывать такие эффекты, как насыщение магнитной системы и потери в стали. При этом насыщение характеризуется изменением взаимной индуктивности статора и ротора при изменении величины магнитного потока, а потери в стали отражают потери мощности в магнитоприводе АМ.

Задача синтеза Simulink-модели АМ решается с использованием различных подходов, т.е. используя разные библиотеки, содержащие блоки электрических машин, которых сегодня насчитывается уже три.

Кратко рассмотрим их.

1. Библиотека стандартных «математических» блоков *Simulink*. Данная библиотека содержит элементарные блоки, которые являются основой для построения более сложных систем. Модель объекта, составленная в блоках *Simulink*, условно может быть названа «математической» моделью, поскольку имеет математический тип сигналов, передаваемых от одного блока к другому. Такая модель АМ хорошо подходит для моделирования штатных режимов работы машины.

Однако математическое описание АМ в двигательном и генераторном режимах работы имеет отличия. Если в двигательном режиме входными сигналами являются статорные напряжения (редко – токи), а выходными обычно являются электромагнитный момент и частота вращения, то в генераторном режиме все наоборот. Данная особенность обуславливает сложности, связанные с применением библиотеки стандартных блоков для создания универсальной модели АМ.

2. Библиотека «физических» блоков *Simscape*. Данная библиотека представлена двумя вложенными библиотеками: *Simscape Components* и *Specialized Technology*, каждая из которых содержит различные блоки, предназначенные для т.н. «физического» моделирования. Большим преимуществом библиотеки *Simscape* является наличие уже готовых блоков электрических машин, а также полупроводниковых элементов и силовых преобразователей на их основе.

Вложенная библиотека *Simscape Components* является относительно новой и используется для отдельных задач при моделировании. Так, преимуществом данной библиотеки является наличие большого числа блоков для моделирования электрических, механических, тепловых и других процессов, что достаточно актуально. Однако блоки электрических машин все еще ограничены по числу задаваемых параметров. Например, отсутствует возможность учета эффектов насыщения магнитной системы или изменения обмоточных параметров в процессе работы машины.

Блок *Asynchronous Machine* в составе библиотеки *Specialized Technology* хорошо подходит для таких задач. Функционал данного блока позволяет учесть нелинейность  $L_m$  в виде статической зависимости действующего линейного напряжения от действующего фазного тока  $U_{1,eff}(I_{ph,eff})$ . Данную зависимость можно получить, проведя опыт хо-

лостого хода для реальной машины, однако данная нелинейность не всегда имеется в таком виде.

Более удобный способ учета нелинейности взаимной индуктивности ее от величины потокосцепления ротора  $L_m(\psi_r)$  или от главного потокосцепления  $L_m(\psi_m)$ .

Кроме того, очень часто требуется учет варьирования не только  $L_m$ , но и других параметров, например активных сопротивлений статора и ротора процессе работы машины, чего не позволяют делать стандартные блоки библиотеки *Simscape*.

По этой причине актуальной задачей является разработка уточненной модели АМ, которая позволяет учесть переменные параметры схемы замещения, а также будет иметь «физические» входные статорные клеммы для подключения к блоку силового преобразователя. Это позволит имитировать процессы не только в двигательном, но и в генераторном режиме работы машины.

Предлагаемая модель АМ базируется на принципе, описанном в работах [1], [2]. Отличительной особенностью данной модели является применение блоков двух библиотек – *Simulink* и *Simscape*, иными словами, предлагаемая модель является гибридной по своей природе.

Так, «физическая» цепь статора базируется на силовых элементах *Series RLC Branch* «физического» типа, соединенных в «звезду». Кроме того, посредством блока источника напряжения *Controlled Voltage Source* учитывается влияние противо-ЭДС машины, которое рассчитывается в «математической» части модели, а вышеупомянутый блок преобразует *Simulink*-сигнал в *Simscape*-сигнал. «Математическая» часть построена на базе блоков библиотеки *Simulink*. Также в «математической» части рассчитываются потокосцепления, момент и частота вращения ротора.

Взаимодействие между двумя частями модели АМ осуществляется благодаря блокам преобразования типов сигналов. Так, *Simulink*-сигнал преобразуется в *Simscape*-сигнал посредством блоков *Voltage Measurement* и *Current Measurement*, а обратное преобразование выполняется с помощью блоков *Controlled Voltage Source* и *Controlled Current Source*.

Однако у такого представления имеется существенный недостаток: цепь статора построена на базе блока *Series RLC Branch*, который позволяет задавать параметры сопротивления и индуктивности только в

виде константы, поскольку данные параметры задаются в нем жестко. Отсюда возникает необходимость в преобразовании модели статорной цепи к виду, позволяющему делать параметры активного сопротивления статора  $R_s$  и индуктивности рассеяния  $L_{\sigma}$  переменными.

Для этого следует несколько изменить подход к расчету величин статорной цепи. Так, в предлагаемой переработанной версии модели (рис. 1) ток статора следует рассчитать «математическим» способом с применением блоков библиотеки *Simulink*.

Здесь входным сигналом является напряжение статора, а выходным – ток статора. При этом элементы источников регулируемого напряжения заменяется элементами источников регулируемого тока, на каждый из которых подаются рассчитанные токи по трем фазам (рис. 2).

Описанная модель асинхронной машины применялась в работе [3], где также даны уравнения цепей электрического равновесия статора и ротора с учетом потерь в стали. Данные потери учитываются путем включения элемента активного сопротивления  $R_m$  последовательно взаимной индуктивности  $L_m$ .

Однако чтобы получить сигнал трехфазного напряжения, его необходимо должным образом измерить и перевести из Simscape-типа в Simulink-тип. В данном контексте возникает сложность измерения фазных напряжений статора, поскольку машина не имеет нулевого провода, а математическое описание оперирует именно фазными значениями, а

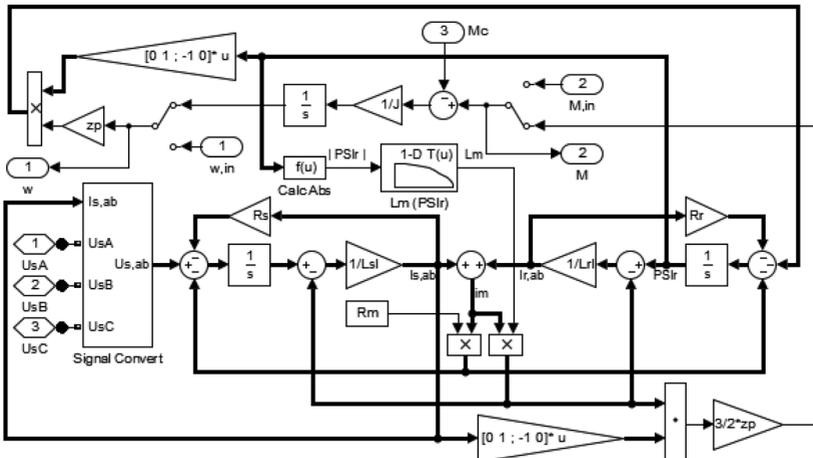


Рис. 1. Модель асинхронной машины в среде MATLAB/Simulink

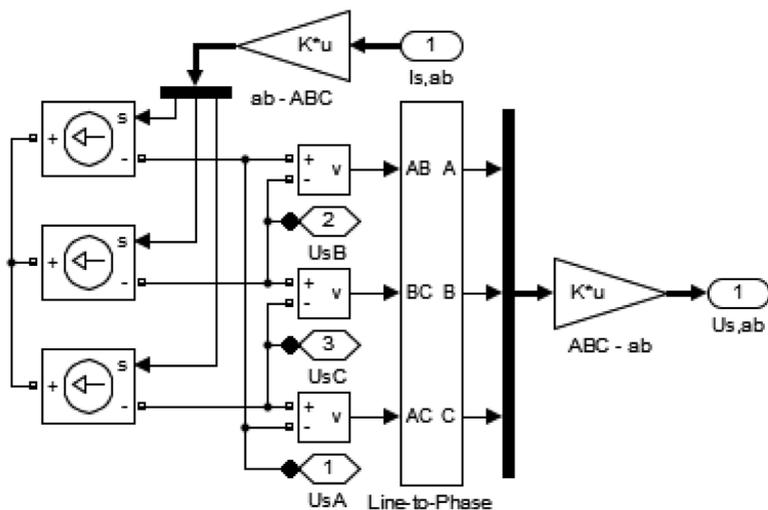


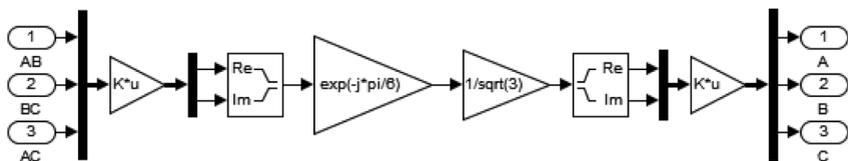
Рис. 2. Подсистема блока преобразования сигналов “Signal Convert”

не линейными, которые легко измерить. Тем не менее, решение данной проблемы также имеется, и заключается в измерении линейных напряжений, которые в дальнейшем преобразуются в фазные напряжения.

Такое преобразование выполняется в несколько этапов. Так, сначала формируется пространственный вектор линейного напряжения, после чего поворачивается по фазе на  $30^\circ$ , а также уменьшается по амплитуде в  $\sqrt{3}$  раз. Полученный вектор раскладывается на составляющие в трехфазной системе координат (СК), которые и являются фазными напряжениями статора.

С математической точки зрения последовательность действий будет следующей: измеряются составляющие линейного напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ , после чего применяется координатное преобразование из трехфазной СК в двухфазную ортогональную. Полученные составляющие на действительную и мнимую оси формируют комплексное число, являющееся пространственным вектором. После преобразования угла поворота и модуля данное число раскладывается снова по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ , которые далее преобразуются к составляющим по осям трехфазной СК  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Подсистема блока преобразования линейных напряжений к фазным показана на рис. 3.

Для проверки корректности разработанной модели следует срав-

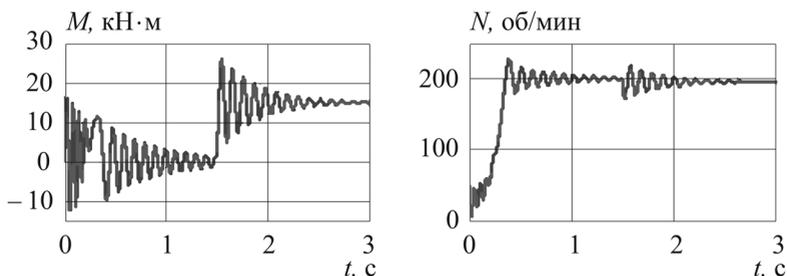


**Рис. 3.** Подсистема блока преобразования линейных напряжений к фазным “Line-to-Phase”

нить ее с имеющейся моделью библиотеки *Simscape* (блок *Asynchronous Machine*). Простейший способ сравнения – моделирование переходных процессов при прямом пуске и набросе нагрузки на участке установившейся частоты вращения.

Результаты моделирования в виде переходных процессов показаны на рис. 4, где показаны момент и угловая скорость для блока *Asynchronous Machine* и для разработанной модели. В момент времени  $t = 0$  на статор скачком подается трехфазное переменное напряжение с частотой 20 Гц, а в момент времени  $t = 1,5$  с происходит скачкообразный наброс номинальной нагрузки, равной 15 кН·м.

Из рисунка видно, что графики момента и частоты вращения идентичны для двух моделей, что позволяет применять предложенный вариант модели АМ при использовании для задач моделирования электроприводов на базе АМ со скалярным или векторным управлением..



**Рис. 4.** Графики переходных процессов при прямом пуске с применением модели АМ из библиотеки *Simscape* и разработанной модели

### Список литературы

1. Шевченко І.С., Морозов Д.І. Електромеханічні процеси в асинхронному електроприводі. Алчевськ: ДонДТУ, 2009.
2. Толочко О.И., Розкаряка П.И., Журов И.О. Моделирование асинхронного двигателя при обрыве фазы статора // Электротехнические и компьютерные системы. 2014. № 15.

3. **Zhurov I., Baydaand S., Florentsev S.** Field-Oriented Control of the Induction Motor as Part of the Shunting Locomotive Powertrain Considering Core Losses and Magnetic Saturation / 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED), 2022.

## КАБЕЛИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ С ПЛЕНКО-ПОРИСТОЙ ФТОРОПЛАСТОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

*Шолуденко М.В., Семенова Н.А., Боровик А.А.,  
Бояркин М.И.*

*Москва, ОАО «ВНИИКП»*

ОАО «ВНИИКП» разработало серию кабелей для высокоскоростных интерфейсов марок КСФпЭлопФ 1×2×0,6, КСФпЭлФ 1×2×0,48+1×0,48, КСФпЭлопФ 2×2×0,6 и КСФпЭлопФ 1×4×0,6.

Кабели для высокоскоростных интерфейсов предназначены для стационарной прокладки в устройствах и аппаратуре передачи данных в диапазоне частот до 400 МГц и эксплуатации при напряжении до 145 В переменного тока частоты 50 Гц (или 200 В постоянного тока).

Токопроводящие жилы кабелей - многопроволочные из посеребренных медных проволок.

Изоляция токопроводящих жил – двухслойная, состоит из слоя пористого фторопласта, полученного методом физического вспенивания, и слоя сплошного фторопласта.

Сердечники кабелей скручены из изолированных пленко-пористым фторопластом токопроводящих жил, имеющих отличительную расцветку, корделей-заполнителей и контактного проводника в зависимости от марки.

Поверх сердечника последовательно наложены общий экран и оболочка из фторопласта.

Волновое сопротивление кабелей – 100 Ом.

Диапазон рабочих частот:

- до 100 МГц для кабелей КСФпЭлопФ 1×2×0,6, КСФпЭлопФ 2×2×0,6 и КСФпЭлопФ 1×4×0,6;
- до 400 МГц для кабеля КСФпЭлФ 1×2×0,48+1×0,48.

Диапазон рабочих температур:

- от минус 65 °С до 155 °С для кабеля КСФпЭлопФ 1×2×0,6;
- от минус 65 °С до 200 °С для кабелей КСФпЭлопФ 1×2×0,6, КСФпЭлопФ 2×2×0,6 и КСФпЭлопФ 1×4×0,6.

Кабели стойки к воздействию многократных изгибов при нормальных климатических условиях и при пониженной температуре.

Число циклов многократных изгибов на угол  $\pm 90^\circ$  при радиусе изгиба не менее 10 наружных диаметров кабеля:

- не менее 500 при нормальных климатических условиях;
- не менее 100 при температуре минус 15 °С.

Кабели не распространяют горение при одиночной прокладке.

Срок службы кабелей – 35 лет.

Разработанные кабели для высокоскоростных интерфейсов по своим электрическим параметрам соответствует зарубежным аналогам, а по стойкости к внешним воздействующим факторам, требованиям безотказности и сохраняемости превосходят зарубежные и отечественные аналоги.

## ОБРАТНЫЙ ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ ПЕРЕХОД В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ Au

*Томилина О.А., Томилин С.В., Бержанский В.Н.*

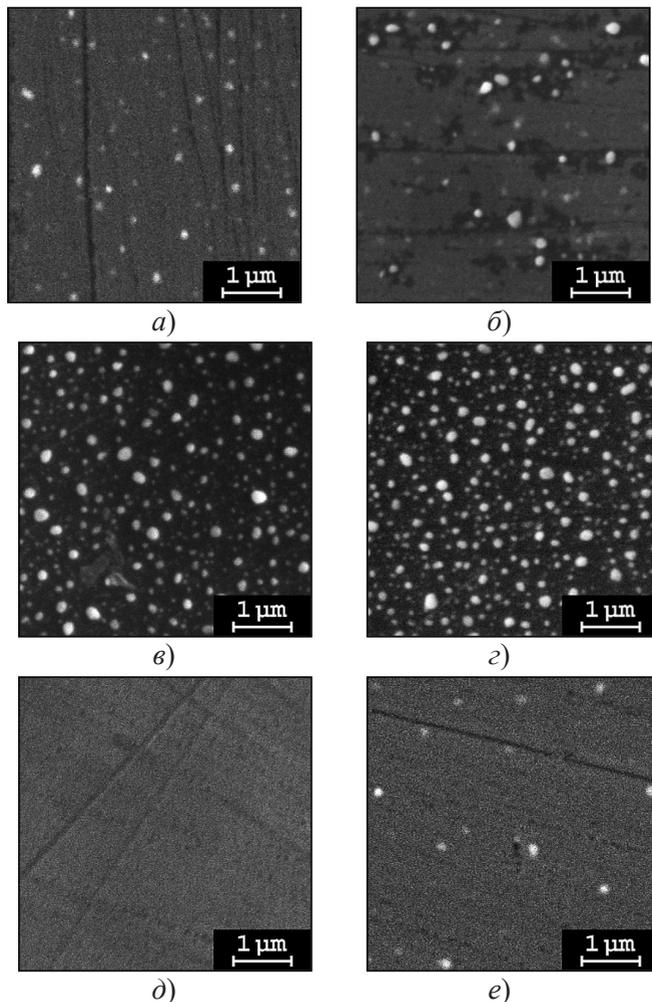
*ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»*

Цель исследования – анализ изменения структурных и оптических свойств тонких плёнок Au при обратном перколяционном переходе.

Для исследования временной динамики структурной декомпозиции тонких металлических плёнок при термоактивированной грануляции (обратный перколяционный переход, ОПП) была изготовлена серия из 6 образцов плёнок Au/GGG. Напыляемый материал Au с чистотой 98,5 %, подложки – полированные пластины монокристалла гадолиний-галлиевого граната  $Ga_3Gd_5O_{12}$  (GGG). Напыление происходило на подложки

при температуре 100°C. Толщина напылённого слоя  $h_{eff} = 10$  нм.

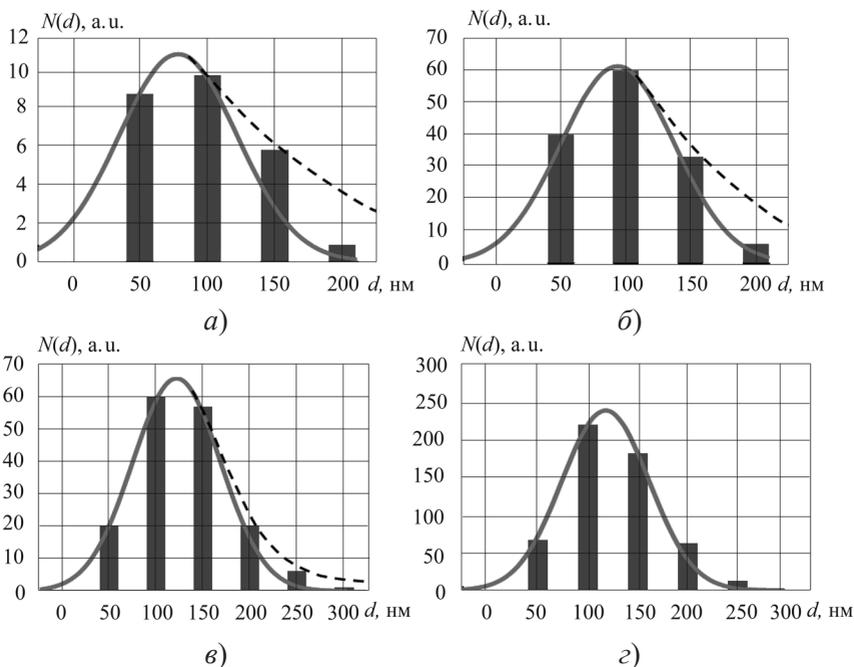
Термоактивированная грануляция (ТАГ) осуществлялась методом изотермического отжига на воздухе при температуре 550°C, в течение 1, 2, 5, 10, 30 и 60 мин соответственно для разных образцов. Результаты РЭМ-исследования морфологии поверхности образцов (микроскоп РЭМ-106, SELMI) показаны на рис. 1.

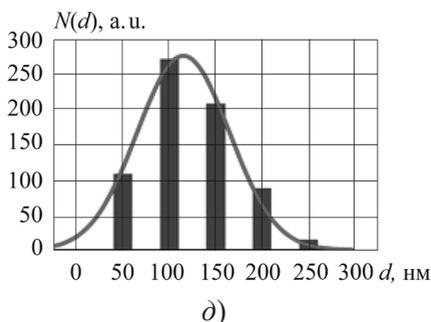


**Рис. 1.** Морфология поверхности плёнки Au/GGG ( $h_{eff} = 10$  нм) после ТАГ при 550°C (микроскоп РЭМ-106, SELMI): *a* – 1 мин, *б* – 2 мин, *в* – 5 мин, *г* – 10 мин, *д* – 30 мин, *е* – 60 мин.

Как видно из рисунка при малом времени отжига 1 мин. (рис. 1а) структура плёнки Au/GGG является однородной и сплошной. После отжига 2 мин. (рис. 1б) начинают образовываться отдельные наноструктуры, отстоящие друг от друга на большом расстоянии. Примечательно, что островки образуются на поверхности сплошной плёнки Au, что возможно только в результате термоактивированной поверхностной самодиффузии, механизм которой подробно рассмотрен в [1. 2]. В результате отжига плёнки в течение 5 мин. (рис. 1в) количество островков увеличивается, однако сама плёнка по-прежнему остаётся сплошной. После отжига 10 мин. (рис. 1г) плёнка наконец начинает терять сплошность и в её структуре появляются дефекты типа «трещина», однако протяжённые перколяционные каналы ещё сохраняются. Отжиг 30 мин. (рис. 1д) приводит к почти полной грануляции плёнки, остаются лишь отдельные участки. При этом структура покрытия представляет собой ансамбль самоорганизующихся наночастиц золота Au(NP)/GGG. И после 60 мин. отжига (рис. 1е) структура покрытия становится полностью наноструктурной.

На рис. 2 показаны диаграммы статистики наноструктур по размерам, полученные в результате анализа РЕМ-снимков на рис. 1.





**Рис. 2.** Распределение островков по размерам для плёнки Au/GGG ( $h_{eff} = 10$  нм) после ТАГ при  $550$  °С: *a* – 2 мин, *б* – 5 мин, *в* – 10 мин, *г* – 30 мин, *д* – 60 мин.

Как видно из представленных гистограмм, для малых времён отжига 2 – 10 мин. (ниже порога перколяции) наблюдается существенное отклонение распределения от симметричного распределения Гаусса (на рисунке нормальное распределение показано сплошной линией, отклонение от симметрии показано пунктиром). Данное отклонение вызвано наличием большого числа крупных островков и кластеров. островков и кластеров. Строго говоря после отжига 2 и 5 мин. самый большой островковый кластер – это вся плёнка, поскольку островки образуются на поверхности сплошного однородного покрытия (при анализе размер самого большого кластера условно принят равным полю зрения РЭМ).

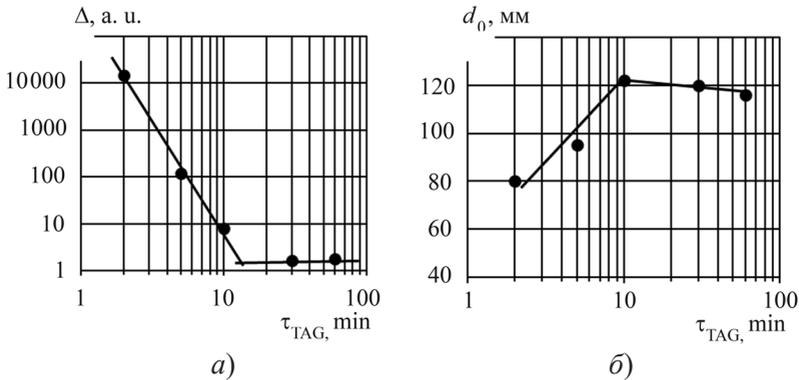
Асимметрию распределения можно охарактеризовать с показателем асимметрии  $\Delta$ , который может быть определён как смещение максимума распределения:

$$\Delta = \frac{d_{\max} - d_0}{d_0 - d_{\min}},$$

где  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$  и  $d_0$  – соответственно самый большой, самый маленький и наиболее вероятный размер островков в распределении.

Анализ асимметрии распределения на основании параметра асимметрии  $\Delta$ , рассчитанного на основании (1), показан на рис. 3а.

Видно, что для малых времён отжига показатель асимметрии распределения имеет убывающую экспоненциальную зависимость от времени отжига, в то время как для «больших» времён  $\tau_{TAG}$  показатель асимметрии практически не меняется, приближаясь к единице. Таким образом, можно сделать вывод, что асимметричность распределения,

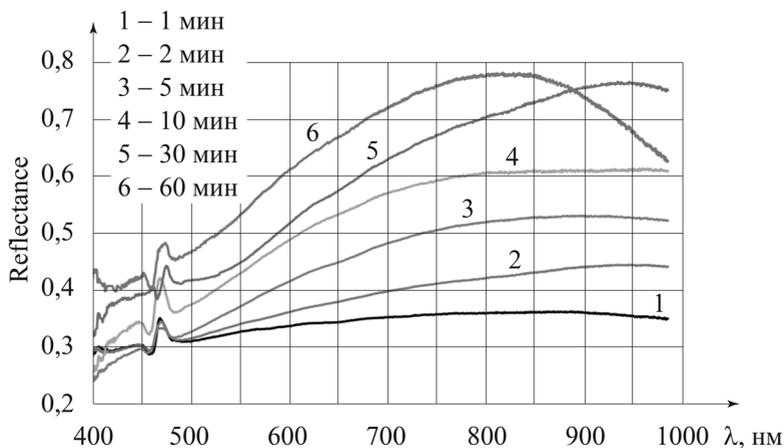


**Рис. 3.** Зависимость от времени отжига (Au/GGG,  $h_{eff} = 10$  нм, после ТАГ при  $550^\circ\text{C}$ ): *a* – показателя асимметрии распределения, *б* – наиболее вероятного размера островков.

обусловленная наличием в структуре плёнки больших кластеров, является прямым «индикатором» обратного перколяционного перехода.

На рис. 3б показана зависимость положения максимума распределения (наиболее вероятный размер островка  $d_0$ ) от времени ТАГ. Видно, что с увеличением времени отжига значение наиболее вероятного размера островков  $d_0$  сначала увеличивается, а после обратного перколяционного перехода уменьшается по экспоненциальному закону. Таким образом в точке перколяционного перехода функция зависимости наиболее вероятного размера островков  $d_0$  от времени грануляции имеет излом и также может служить «индикатором» фазового перехода второго рода, т.е. обратного перколяционного перехода.

На рис. 4 представлены спектры отражения под углом  $45$  град плёнки Au/GGG ( $h_{eff} = 10$  нм) после ТАГ при  $550^\circ\text{C}$ . Время грануляции



**Рис. 4.** Спектры отражения (угол 45 град) плёнки Au/GGG ( $h_{eff} = 10$  нм) после ТАГ при  $550^{\circ}\text{C}$ , время указано в легенде.

варьировалось от 1 до 60 мин. Видно, что после обратного перколяционного перехода (30 и 60 мин.) в спектрах отражения наблюдается характерный экстремум, который соответствует возбуждению локализованного плазмонного резонанса в металлических наночастицах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-72-20154*

#### Список литература

1. Tomilin S.V., Yanovsky A.S. // J. of Nano- and Electronic Physics. 2013. Vol. 5. No 3.
2. Yanovsky A.S., Tomilin S.V. // J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7. № 1.

# ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ТРАНСПОРТЕ

*Саушев А.В., Белоусов И.В., Бова Е.В., Широков Н.В.*

*Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО «ГУМРФ  
имени адмирала С. О. Макарова»*

Рассматриваются результаты перспективных исследований в области автоматизированного электропривода (АЭП), выполненных на кафедре электропривода и электрооборудования береговых установок (ЭПиЭОБУ) ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова».

Как известно, электропривод включает в свой состав следующие элементы: преобразователь электрической энергии (ПЭЭ), электромеханический преобразователь (ЭМП), механический преобразователь (МП) и систему управления электропривода (СУЭП). В качестве ПЭЭ в последние годы самое широкое применение находят частотные преобразователи, построенные на основе управляемого выпрямителя, фильтра и автономного инвертора напряжения на базе IGBT транзисторов. Долгие годы среди известных видов ЭМП безоговорочным лидером являлся асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Однако, в последнее время, преимущественно на транспорте, стали применяться вентильно-индукторные машины с постоянными магнитами. Активно ведутся разработки и испытания реактивных электродвигателей, среди которых наиболее перспективными являются электродвигатели с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Для управления электроприводом преимущественно используется структура с подчиненным регулированием координат, настраиваемая на технический оптимум и реализующая алгоритмы векторного управления. При этом наряду с управлением, достаточно часто реализуется и функция идентификации параметров элементов электропривода. Для этих целей все шире применяются интеллектуальные технологии на основе нейронных сетей.

В свете вышеизложенного, на кафедре ЭПиЭОБУ в области электропривода ведутся исследования по четырем основным направлениям.

Первое направление [1] предполагает разработку конструкции и методики проектирования реактивных электрических машин, принцип

действия которых основан на пульсациях собственных индуктивностей обмоток статора. Размах этих пульсаций определяет величину электромагнитного момента машины и обусловлен конструктивными особенностями их ротора. В настоящее время известны два конструктивных решения. Первое из них состоит в придании основанию цилиндра ротора зубчатой формы, а второе – в придании материала цилиндра ротора свойств, обуславливающих его анизотропную магнитную проводимость. Наиболее интенсивно развивающимся классом электрических машин являются реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора, принцип действия которых основан на пульсациях, как собственных, так и взаимных индуктивностей обмоток статора. Ротор такой электрической машины может быть выполнен с применением двух технологий: продольной шихтовки полюса ротора (ALA – Axially Laminated Anisotropic) и поперечной шихтовки ротора со специальными вырезами (TLA – Transversally Laminated Anisotropic). Главным преимуществом рассматриваемого класса электрических машин является то, что ротор такой электрической машины пассивный и не содержит обмоток и постоянных магнитов. В течение последних нескольких лет была проведена работа по созданию и апробированию методики проектирования данного класса реактивных электрических машин. Разработаны, апробированы и внедрены алгоритмы управления по различным критериям, предложены и изготовлены различные конструктивные исполнения таких электрических машин. В частности, были изготовлены и испытаны макеты предложенной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора установленной мощностью 1,5 кВт и 500 кВт. Результаты физического моделирования ряда спроектированных и изготовленных машин с высокой степенью точности подтвердили разработанную теорию и методику проектирования. Для испытаний предложенного ряда электрических машин были спроектированы и изготовлены электрические преобразователи с системой управления. Экспериментальные исследования реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора установленной мощностью 500 кВт показали высокие энергетические характеристики. Так при номинальной установленной мощности КПД электромеханического преобразователя составил 99 %, а коэффициент мощности – 0,77. При этом габаритные размеры электрической машины установленной мощностью 500 кВт на 1000 об/мин

составили  $1102 \times 910 \times 1102$  мм, а масса 2100 кг. Выполненные исследования определяют перспективы дальнейших разработок и практического использования реактивных электрических машин в электроприводе самого широкого назначения.

Второе направление исследований направлено на разработку робастных систем векторного управления электроприводами. В рамках этого направления выполнены исследования по оптимизации широтно-импульсной модуляции по критерию минимума дисперсии тока. Это позволило получить аналитические зависимости, связывающие потери энергии и регулировочные параметры электропривода. Разработаны и апробированы алгоритмы, позволяющие реализовать управление с максимальным быстродействием, либо с максимальным показателем энергетической эффективности. Разработаны и апробированы алгоритмы робастного управления и двухзонного управления электрической машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Третье направление исследований [2] направлено на разработку методов и средств управления состоянием электроприводов. Отечественный и зарубежный опыт проектирования и эксплуатации электротехнических систем различного назначения показывает, что основную часть отказов составляют постепенные отказы, а статистическая информация о законах изменения их параметров ограничена. Данное обстоятельство привело к появлению функционально-параметрического направления в теории надежности, которое предусматривает управление состоянием в условиях ограниченной информации или ее отсутствия. В рамках данного направления разработана стратегия, которая предусматривает обеспечение запаса работоспособности АЭП на всех этапах их жизненного цикла. Под запасом работоспособности понимается степень приближения вектора фактического состояния системы к ее предельно допустимому значению. Оценка состояния АЭП осуществляется в пространстве ее внутренних параметров (коэффициенты усиления, постоянные времени, и т. п.). Важнейшим условием для решения задачи является определение области работоспособности ЭТС. В настоящее время разработаны эффективные методы и алгоритмы математического описания областей работоспособности для сложных электротехнических систем. Предлагаемая стратегия предполагает применение автоматизированных информационных систем, обеспечивающих анализ априорной информации и накопление статистических данных о параметрах и показа-

телях качества исследуемых АЭП на всем протяжении их жизненного цикла. На стадии проектирования управление состоянием сводится к структурно-параметрическому синтезу АЭП, обеспечивающему заданный или максимально возможный запас работоспособности системы. На кафедре ЭП и ЭОБУ разработаны методы, алгоритмы, программное обеспечение и технические средства, впервые позволившие решить задачу оптимизации по критерию запаса работоспособности для сложных, многопараметрических систем с произвольной формой области работоспособности. На этапе наладки решаются задачи настройки и контроля состояния АЭП. На стадии эксплуатации важнейшей задачей является оценка запаса работоспособности системы в требуемый момент времени. Разработанные методы, алгоритмы и технические средства позволяют с высокой достоверностью количественно оценить состояние АЭП в процессе его эксплуатации, а также решить задачи превентивной защиты. Результаты моделирования и многочисленные натурные исследования подтвердили работоспособность и эффективность разработок.

Четвертое направление исследований [3] направлено на разработку методов управления электроприводами в эргатических системах на основе неполных представлений элементарных движений. Рассматриваемое управление основано на принципе совмещения во времени ручного и автоматического управления электромеханическим объектом эргатической системы «человек-машина». Эффективность такого совместного управления, реализуемого человеком-оператором и автоматом эргатической системы, обоснована по результатам натурных экспериментов с судами в условиях повышенной опасности плавания, а также подтверждается положительными отзывами об эффективности элементов совмещенного управления в различных областях, например, в авиации для управления по принципу HOTAS. Основу синтеза управления составляет формализация модели действий и ответных реакций человека-оператора и машины, разработанной В.Г. Денисовым и В.Ф. Онищенко. Построены математические модели действий применительно к органам управления человеко-машинного интерфейса в соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 60447-2000. При этом использованы неполные представления управляемых движений в форме обыкновенных дифференциальных уравнений. Ответные реакции электропривода и в целом системы «человек-машина» моделируются для каждого целена-

правленного действия человека-оператора в пространстве состояний системы. Таким образом, получено множество представлений элементарных движений системы «человек-машина».

Синтез управления на основе множества неполных представлений элементарных движений системы предусматривает последовательное решение задач построения последовательности представлений элементарных движений, выбираемых из указанного множества для достижения поставленных целей, и однокритериальную или многокритериальную оптимизацию моментов времени смены элементарных движений. К настоящему времени получены частные решения первой задачи для управляемого движения судна в условиях повышенной опасности плавания и предложены процедуры решения второй задачи с применением градиентного метода и параллельного интегрирования дифференциальных уравнений элементарных движений и соответствующих им уравнений в вариациях.

#### **Список литература**

1. **Гельвер Ф.А., Самосейко В.Ф., Белоусов И.В. Саушев А.В.** Перспективный электропривод на основе реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018. Новочеркасск: «Лик», 2018.

2. **Саушев А.В., Белоусова Н.В., Бова Е.В., Тырва В.О.** Области работоспособности в задачах управления состоянием автоматизированных электроприводов / Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018. Новочеркасск: «Лик», 2018.

3. **Tyrva V.O., Saushev A.V., Shergina O.V.** Automation elements of mental activity and actions of human operator in ergatic system 'man-machine'/ International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018.

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КРАНОВ

*Благодаров Д.А.<sup>1</sup>, Сафонов Ю.М.<sup>1</sup>, Крутских В.В.<sup>1</sup>,*

*Сальников М.С.<sup>1</sup>, Агеев М.Р.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>НИУ «МЭИ»*

*<sup>2</sup>Ассоциация «Подъемтранстехника», г. Москва*

Эффективная работа складской, портовой, железнодорожной инфраструктуры во многом обеспечивается за счет использования различных промышленных электрических кранов. Преимуществом кранов с механизмом передвижения заключается в их возможности обеспечивать обслуживание значительной площади. Для повышения мобильности рациональным решением также является эксплуатация нескольких кранов на участках одного пути.

На рисунке 1 представлена совместная работа на одном пути двух козловых промышленных кранов. Однако такой подход накладывает определенные требования для обеспечения безопасности при работе нескольких кранов во избежание аварийных ситуаций при возможном столкновении кранов друг с другом или препятствием. Поэтому необходи-



**Рис. 1.** Козловые краны работают на одном пути

мость совершенствования и внедрения в систему управления крановых электроприводов элементов, отвечающих за безопасность передвижения и безаварийное торможение, является важной и актуальной задачей [1,2].

Для технической реализации систем по недопущению столкновений кранов используются следующие подходы [3]:

- системы с механическими ограничителями при сближении;
- системы на базе датчиков расстояния, по сигналам которых происходит безаварийное торможение.

На примере общепромышленного козлового крана грузоподъемностью 10 тонн с частотно-регулируемым двухдвигательным электроприводом механизма передвижения на математической модели в среде Matlab Simulink было проведено исследование переходных процессов пусков и торможений в разомкнутой и замкнутой системах регулирования скорости. Сформулированы условия для мест установки датчиков и расчета расстояния для обеспечения безаварийного плавного торможения электроприводов перемещения кранов движущихся навстречу друг другу с рабочими скоростями. В случае, если на одном пути работают три и более козловых крана, на крайние устанавливаются по одному датчику на каждый, на промежуточные краны устанавливается система с двумя датчиками.

Системы с применением ультразвуковых датчиков расстояния являются в настоящее время наиболее перспективными и имеют меньше ограничений по отношению к известным системам на базе лазерных дальномеров и их аналогов. На работе ультразвуковых датчиков не сильно отражается влияние климатических факторов. Уникальной особенностью ультразвуковых устройств является возможность самоочистки. При генерации ультразвуковых волн, прибор под воздействием высокочастотных колебаний настраивается на вибрацию, в результате очищаясь от загрязнений. Также рекомендуется использовать датчики с выходным аналоговым сигналом по току, который дает возможность передавать управляющее воздействие с датчика к преобразователю частоты на значительное расстояние без потери сигнала.

### **Список литературы**

1. Агеев М.Р., Благодаров Д.А., Сафонов Ю.М., Марачев А.П. Под ред. М. Ю. Левина. Частотно-регулируемый электропривод для механизмов крановых перегружателей / Сборник научных трудов Международной научной конференции «Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения». Липецк, 2017 г.).

2. **Благодаров Д.А., Владимиров А.А., Гостева Л.О., Киселева О.И., Сафонов Ю.М., Агеев М.Р.** Управление многодвигательным крановым электроприводом / Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности. Сборник научных статей IX международной научной конференции. Волгоград: ООО «Конверт», 2021.

3. **Благодаров Д.А., Гостева Л.О., Зотов П.В., Сальников М.С., Сафонов Ю.М., Агеев М.Р.** Подходы к реализации безопасного передвижения кранов / Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности. Сборник научных статей III международной научно-практической конференции. Волгоград: ООО «Конверт», 2022.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ДВУХРЯДНЫХ АКСИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КАНАЛОВ СТАТОРА НА ЭФФЕКТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА, ВОЗНИКАЮЩИХ В СПЛОШНЫХ ОБОЛОЧКАХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Захаров А.В., Бедкер А.А., Кащенко А.В., Кобелев А.С.*

*г. Москва, «Инжиниринговый центр «Русэлпром»*

Распространенным типом охлаждения асинхронных энергонасыщенных тяговых электродвигателей мощностью до 1200 кВт, используемых в приводе тяжелого колесного и железнодорожного транспорта, является воздушное охлаждение IC01 IC06 по ГОСТ Р МЭК 60034-6-2012. При этом, как правило, используются аксиальные вентиляционные каналы в яре статора.

В совокупности с необходимостью повышения удельных электромагнитных нагрузок, характерных для тяговых электродвигателей, использование аксиальных каналов в яре статора существенно увеличивает общий уровень насыщения яра электродвигателя, что приводит к известному эффекту «вытеснения» магнитного потока из шихтован-

ного магнитопровода в сплошную станину (оболочку) [1]. При этом в режимах эксплуатации, связанных с работой электродвигателя с номинальным магнитным потоком, появляются добавочные потери, которые классифицируются как добавочные потери холостого хода [2] и могут быть измерены (выделены) в соответствующем опыте. Методы выделения данных потерь известны [3].

Снижение эффекта возникновения вытеснения магнитного поля в электродвигателях с однорядным аксиальным вентиляционным каналом очевидно и связано с уменьшением радиального размера канала при увеличении его азимутального размера. Это приводит к применению овальных каналов [4] или рассечением круглого канала перемычкой, так что круглый канал разделяется на два полукруглых канала, при этом перемычки образуют дополнительную ширину ярма статора.

В случае применения двухрядных аксиальных каналов выбор формы канала для его последующей оптимизации становится неочевидным.

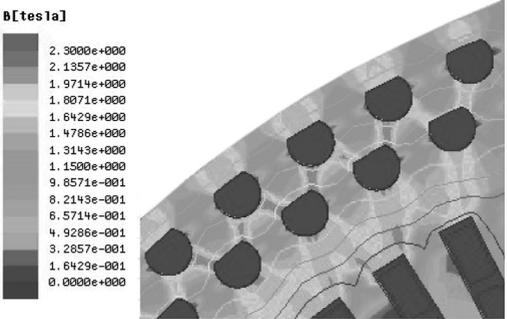
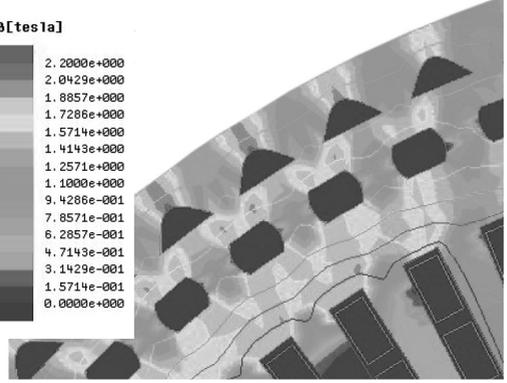
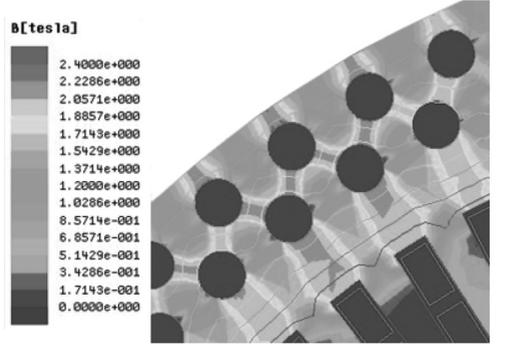
Для решения указанной задачи была проведена исследовательская работа, в которой использовалась модель магнитного поля асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1000 кВт, с номинальной частотой вращения 1160 об/мин и числом полюсов  $2p = 6$ . Моделирование проводилось методом конечных элементов. При этом проводилась оценка эффекта вытеснения для различных способов увеличения ширины ярма статора – уменьшения радиального размера канала при увеличении его азимутального размера. Оценка эффекта вытеснения проводилась на основе оценки амплитуды магнитной индукции на периферийном участке ярма статора, а также по косвенным признакам [4,5].

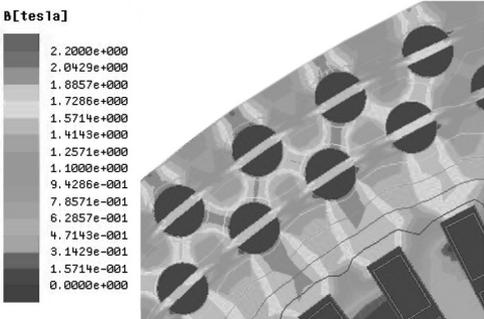
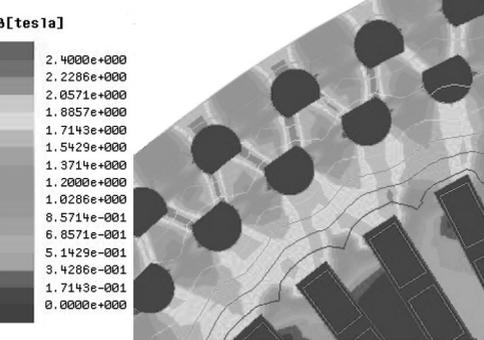
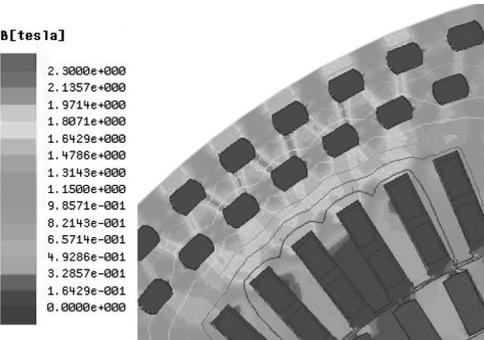
В таблице 1 приведены основные результаты исследования.

В таблице 1 приведены два косвенных критерия, по которым можно выявить эффект вытеснения магнитного потока из ярма статора в оболочку:

- отношение значений тока холостого хода, рассчитанных для магнитопровода с каналами  $I_0$  и без них  $I_0^*$ . При этом необходимо использовать модели на основе метода конечных элементов при граничном условии нулевого векторного потенциала  $A_z = 0$  на внешней поверхности статора к  $I_0/I_0^*$ .

Таблица 1

№ п/п	Картина магнитного поля	$I_0/I_0^*$	$B_{j1}$ , ТЛ
1	<p><b>B[tesla]</b></p>  <p>2.3000e+000 2.1357e+000 1.9714e+000 1.8071e+000 1.6429e+000 1.4786e+000 1.3143e+000 1.1500e+000 9.8571e-001 8.2143e-001 6.5714e-001 4.9286e-001 3.2857e-001 1.6429e-001 0.0000e+000</p>	1,4	1,95
2	<p><b>B[tesla]</b></p>  <p>2.2000e+000 2.0429e+000 1.8857e+000 1.7286e+000 1.5714e+000 1.4143e+000 1.2571e+000 1.1000e+000 9.4286e-001 7.8571e-001 6.2857e-001 4.7143e-001 3.1429e-001 1.5714e-001 0.0000e+000</p>	1,13	1,86
3	<p><b>B[tesla]</b></p>  <p>2.4000e+000 2.2286e+000 2.0571e+000 1.8857e+000 1.7143e+000 1.5429e+000 1.3714e+000 1.2000e+000 1.0286e+000 8.5714e-001 6.8571e-001 5.1429e-001 3.4286e-001 1.7143e-001 0.0000e+000</p>	1,30	1,85

№ п/п	Картина магнитного поля	$I_0/I_0^*$	$B_{j1}$ , Тл
4	<p><b>B[tesla]</b></p>  <p>2.2000e+000 2.0429e+000 1.8857e+000 1.7286e+000 1.5714e+000 1.4143e+000 1.2571e+000 1.1000e+000 9.4286e-001 7.8571e-001 6.2857e-001 4.7143e-001 3.1429e-001 1.5714e-001 0.0000e+000</p>	1,25	1,82
5	<p><b>B[tesla]</b></p>  <p>2.4000e+000 2.2286e+000 2.0571e+000 1.8857e+000 1.7143e+000 1.5429e+000 1.3714e+000 1.2000e+000 1.0286e+000 8.5714e-001 6.8571e-001 5.1429e-001 3.4286e-001 1.7143e-001 0.0000e+000</p>	1,21	1,84
6	<p><b>B[tesla]</b></p>  <p>2.3000e+000 2.1357e+000 1.9714e+000 1.8071e+000 1.6429e+000 1.4786e+000 1.3143e+000 1.1500e+000 9.8571e-001 8.2143e-001 6.5714e-001 4.9286e-001 3.2857e-001 1.6429e-001 0.0000e+000</p>	1,12	1,80

- значение амплитуды магнитной индукции в периферийной части сердечника ярма статора.

Анализ результатов, приведенных в таблице, показал, что вариант формы аксиального вентиляционного канала соответствующего вариантам 2 и 6 характеризуются минимальными значениями магнитной индукции в периферическом участке ярма статора, а, следовательно, представляют максимальный интерес при реализации.

### Список литература

1. **Захаров А.В., Кобелев А.С., Кудряшов С.В.** Влияние оболочки электрической машины на величину магнитных потерь / Труды международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты». 2012.

2. **Данилевич Я.Б., Каширский Э.Г.** Добавочные потери в электрических машинах. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.

3. **Захаров А.В.** Научные основы энергетического расчета и проектирования электродвигателей переменного тока для мехатронных систем. Дисс... докт. техн. наук. М., 2017.

4. **Захаров А.В., Зайцев А.М., Кобелев А.С., Макаров Л.Н., Розанов Д.Ю.** Применение технологии цифровых двойников при разработке тяговых асинхронных электродвигателей // Электротехника. 2022. № 4.

5. **Захаров А.В.** Исследование потерь холостого хода в асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором АДБС-1200-6У2 / Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XX Бенардосовские чтения). Т. 3. Иваново, 2019.

# ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ $Fe(Ni, Cu)(SiB)$

*Шипко М.Н.<sup>1</sup>, Каминская Т.П.<sup>2</sup>, Степович М.А.<sup>3</sup>, Вирюс А.А.<sup>4</sup>,*

*Тихонов А.И.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Иваново, ИГЭУ им. В.И. Ленина,*

*<sup>2</sup>Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова,*

*<sup>3</sup>Калуга, КГУ им. К.Э. Циолковского,*

*<sup>4</sup>Черноголовка, ИЭМ им. Академика Д.С. Коржунского РАН*

Аморфные сплавы  $Fe(Ni, Cu)(SiB)$  широко используются в электро-технической промышленности для изготовления сердечников цифровых трансформаторов. Одной из причин, сдерживающих более широкое их применение, являются относительно высокие потери на перемагничивание, определяемые состоянием поверхности аморфной ленты и геометрией доменной структуры. В статье исследовано влияние магнитоимпульсной обработки (МИО) [1 – 9] на доменную структуру, состояние поверхности и вихретоковые потери на перемагничивание сплава на различных частотах и при различных значениях индукции магнитного поля.

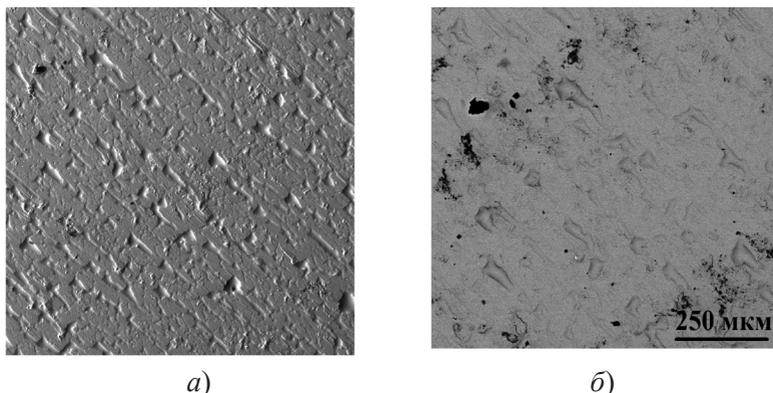
Методы растровой электронной (РЭМ) [10], атомной силовой (АСМ) [11] и магнитной силовой (МСМ) микроскопии совместно с измерениями магнитных характеристик до и после воздействия импульсами слабого магнитного поля (10...100 кА/м) низкой частоты (10...20 Гц) использованы для изучения особенностей состояния поверхности, определяющих доменную структуру, магнитные свойства и магнитные потери при перемагничивании ленточных аморфных сплавов  $Fe(Ni, Cu)(SiB)$ .

Образцы аморфной электротехнической стали (фольги)  $Fe(Ni, Cu)(SiB)$  представляли собой ленту толщиной около 100 мкм, шириной 10 мм, длиной 50 мм, которые были получены методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на вращающемся барабане. Для их магнитоимпульсной обработки использовали импульсы магнитного поля

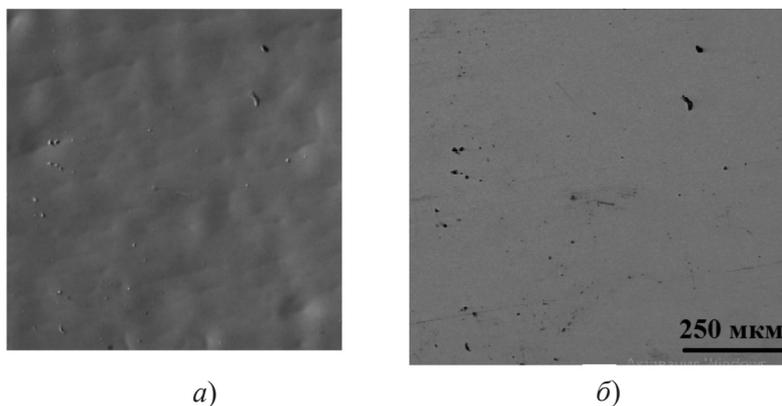
амплитудой  $(5 - 8) \times 10^3 \text{ A/m}^2$  длительностью  $(0,1 - 0,5)$  с с интервалом между импульсами  $(1 - 2)$  с. Количество импульсов составляло  $10 - 50$ .

Микрофотографии поверхности материалов, исследованных методами РЭМ, представлены на рис. 1 и 2, а методами АСМ и МСМ – на рис. 3 и 4, результаты исследований магнитных характеристик – на рис. 5.

Поверхность быстрозакалённых образцов, прилегающая к медному барабану, имеет неоднородную, характерную для всех быстрозакалённых образцов, структуру (рис. 1), из-за чего эта поверхность фольги кажется матовой.



**Рис. 1.** Поверхность матовой стороны фольги в режимах работы РЭМ: вторичная электронная эмиссия (а) и обратно рассеянные электроны (б)



**Рис. 2.** Поверхность блестящей стороны фольги в режимах работы РЭМ: вторичная электронная эмиссия (а) и обратно рассеянные электроны (б)

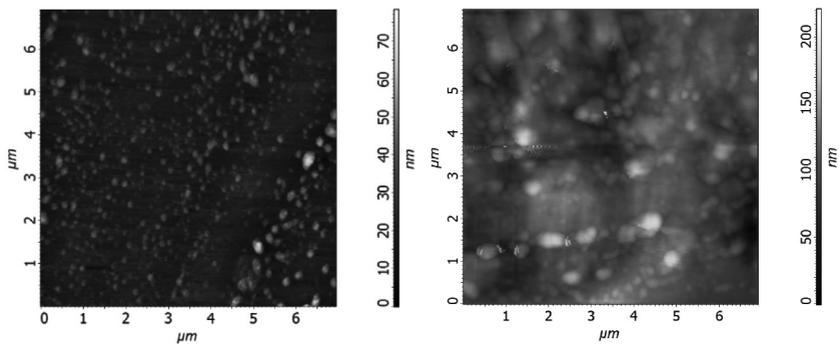


Рис. 3. Поверхность блестящей (а) и матовой (б) сторон фольги в АСМ

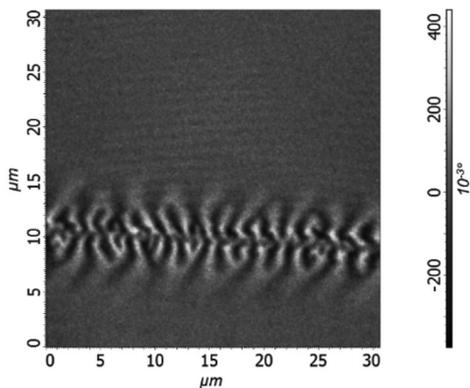
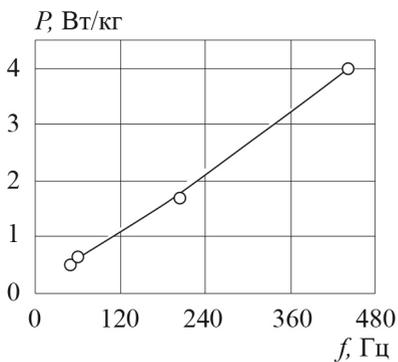
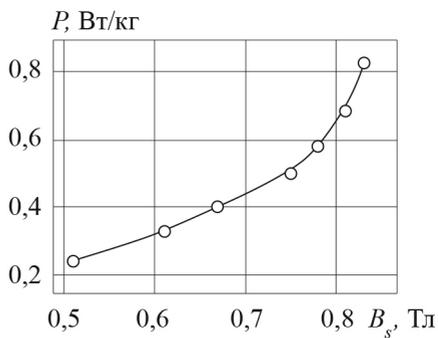


Рис. 4. МСМ-изображение блестящей стороны фольги



а)



б)

Рис. 5. Удельные потери для фольги в зависимости от частоты поля (а) и магнитной индукции (б)

Имеются довольно большие (от 15 – 20 до 100 мкм) неровности ярко выраженной направленности, обусловленные вращением барабана и характером сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на вращающемся барабане. Имеются пористые участки различной размерности – в основном менее 10 мкм, а также области скопления таких пористых участков. Пористые участки и их скопления лучше видны как области тёмного контраста при регистрации сигнала РЭМ в режиме обратно рассеянных электронов (рис. 1,б).

Другая, блестящая на вид, поверхность имела однородную структуру с меньшим количеством пор с размерами менее 10 мкм; скоплений пористых участков здесь не наблюдалось.

АСМ исследования показали, что блестящая сторона имеет шероховатость около 5 – 10 мкм. На поверхности имеются многочисленные выделения практически круглой формы размерами от 20 до 80 мкм. Матовая сторона имеет большую шероховатость около 40 мкм с многочисленными выделениями до 200 мкм. Практически отсутствуют плоские участки поверхности, что не позволило провести МСМ-исследования. После МИО характер шероховатости не изменился.

На МСМ-снимках блестящей стороны до МИО доменной структуры не наблюдалось. После МИО видны полосовые домены шириной 0,6 – 0,8 мкм, замыкающие домены на дефектах структуры шириной от 1 мкм до 1,6 мкм (рис. 4) и крупные и мелкие домены с формой, близкой к треугольной.

Зависимости индукции магнитного поля, потери на перемагничивание и коэрцитивной силы от частоты перемагничивания образцов аморфного сплава при различных значениях напряженности магнитного поля перемагничивания приведены на рис. 5.

## **Выводы**

Установлено, что потери на перемагничивание в большой степени связаны с потерями, обусловленными вихревыми токами, и связаны с шириной доменов, которая незначительно зависит от режимов магнитоимпульсной обработки. Полученные результаты исследований могут быть использованы для уточнения методики снятия напряжений, возникающих в процессе изготовления аморфных лент.

*Исследования проведены при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-03-00271).*

## Список литература

1. **Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А.** Магнитоупругий эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. Т. 48. № 5.
2. **Шипко М.Н., Степович М.А., Староверов Б.А., Костюк В.Х.** Влияние слабых низкочастотных импульсных магнитных полей на физико-механические свойства металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 1.
3. **Вирюс А.А., Каминская Т.П., Шипко М.Н., Степович М.А.** Локальный анализ состава и структуры прецизионных сплавов системы Fe-Si-Al, подвергнутых магнитно-импульсной обработке // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 2.
4. **Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Попов В.В., Шипко М.Н., Степович М.А.** Атомная силовая микроскопия сплавов Fe<sub>3</sub>(SiAl), подвергнутых магнитоимпульсной обработке // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 12.
5. **Kaminskaya T.P., Korovushkin V.V., Popov V.V., Shipko M.N., Stepovich M.A.** Atomic-Force Microscopy of Fe<sub>3</sub>(SiAl) Alloys under Magnetic-Pulse Treatment // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. Vol. 8. № 6.
6. **Коровушкин В.В., Костишин В.Г., Степович М.А., Шипко М.Н.** Влияние магнитоимпульсной обработки на магнитные характеристики иттриевых ферритов-гранатов // Известия РАН. Сер. физическая. 2016. Т. 80. № 12.
7. **Korovushkin V.V., Kostishin V.G., Stepovich M.A., Shipko M.N.** Effect of magnetic pulse treatment on the magnetic characteristics of yttrium-iron garnets // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2016. Т. 80. № 12.
8. **Шипко М.Н., Тихонов А.И., Степович М.А., Вирюс А.А., Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Савченко Е.С., Еремин И.В.** Влияние магнитоимпульсной обработки на микроструктуру и магнитные свойства аморфной электротехнической стали // Известия РАН. Сер. физическая. 2018. Т. 82. № 8.
9. **Shipko M.N., Tikhonov A.I., Stepovich M.A., Viryus A.A., Kaminskaya T.P., Korovushkin V.V., Savchenko E.S., and Eremin I.V.** Effect of Magneto-Pulse Processing on the Microstructure and Magnetic Behavior of Amorphous Electrotechnical Steel // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2018. Vol. 82. № 8.
10. **Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение.** Под ред. Жу У., Уанга Ж.Л. М.: БИНОМ, 2013.

11. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004.

## ОПЫТ КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ ОБМОТОК СТАТОРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Плыткевич В.В., Кузьмичёв В.А.*

*Москва, «НИУ «МЭИ»*

Нормальная работа гидрогенератора во многом определяется состоянием обмотки статора. Для соединения стержней обмотки в единую конструкцию применяют пайку лобовых частей обмотки. В процессе работы гидрогенераторов паяные соединения подвергаются механическим, термическим, электрическим воздействиям, ускоряющим процесс старения и способствующим разрушению. Так, на одной из ГЭС Волжско-Камского каскада до 2009 г. было зафиксировано семь аварийных отключений гидрогенераторов из-за повреждения соединительных шин обмоток статоров вследствие дефектов в паяных соединениях (ПС), а именно старения и разрушения мягкого оловянисто-свинцового припоя марки ПОС-40, которым были соединены встык отдельные дуги шин.

Контроль качества паяных соединений является составляющей технологического процесса при монтаже обмотки статора нового гидрогенератора, а также входит в объём испытаний, проводимых при капитальном ремонте в соответствии с требованиями нормативно-технической документации [1].

Качество пайки во время ремонта обычно проверяется наружным осмотром. Хорошим качеством пайки считается полное заполнение всех зазоров между проводниками припоем. Такая проверка не обеспечивает надёжного и объективного контроля. Поэтому целесообразно применение для контроля паяных соединений специальных методов и приборов. Для определения качества паяных соединений существует два вида обследования: с разрушением (разрушающий контроль) и

без разрушения (неразрушающий) контроль. Разрушающий контроль состоит в том, чтобы разрубить несколько паяных соединений и проверить их качество. Это приводит к серьёзным материальным затратам и не дает исчерпывающей информации при большом количестве соединений. Целесообразнее применять методы неразрушающего контроля. В соответствии с [2] неразрушающий контроль подразделяют на магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический, контроль проникающими веществами.

Магнитный и радиоволновый виды контроля, а также контроль проникающими веществами не применимы в данном случае из-за отсутствия магнитных материалов, применяемых в паяных соединениях, невозможности прохождения радиоволн внутрь объекта контроля для обнаружения непропая и невозможности проникновения внутрь паяного соединения соответствующих веществ. Радиационный вид контроля технически применить можно, но его применение осложнено громоздкостью оборудования и невозможностью его установки вокруг паяного соединения. Оптический вид контроля применим только в визуально-оптическом варианте. Поэтому в настоящее время широко используют оставшиеся четыре способа контроля.

Акустический вид контроля рекомендован для применения справочниками по ремонту и руководящими документами по испытаниям электрооборудования. Существует несколько методов ультразвукового контроля. В рассматриваемом случае для генераторов применяется метод прошедшего излучения. Он заключается в установлении монолитности соединения путём сравнения со специальным установленным эталонным значением. При отсутствии дефекта на пути ультразвуковых колебаний некоторая их часть отражается от нижнего края проверяемого соединения и рассеивается, остальная часть попадает в приемный преобразователь.

Тепловой вид контроля, заключается в том, что для проверки нагрева паяных соединений через обмотку в течение 10 – 15 мин пропускают постоянный ток; при этом температура паек контролируется термометрами и/или тепловизионными приборами. Этот метод применим на практике, однако он вызывает существенные затруднения при контроле гидрогенераторов большой мощности, так как через обмотку требуется пропускать слишком большие токи, а при уменьшении этих токов чувствительности измерительной аппаратуры недостаточно.

Электрический вид контроля заключается в сравнении измеренных значений сопротивлений обмотки постоянному току с заводскими или исходными значениями, на основе которого выявляются фазы и параллельные ветви с повышенными сопротивлениями, что указывает на возможное наличие дефекта. Особенность этих измерений заключается в очень малом значении измеряемых сопротивлений. При этом к этим параметрам предъявляются жёсткие требования. Для обмоток статоров измеренные значения не могут отличаться от исходного значения более чем на 2 % между фазами и 5 % между ветвями. Исходными значениями являются технические параметры, полученные расчётным путём, измеренные изготовителем и включенные в паспорт на электрическую машину. Несмотря на жёсткость требований нормативно-технической документации таких измерений для определения состояния обмотки недостаточно.

Вихретоковый неразрушающий контроль – вид контроля, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем. Для контроля монолитности паяного соединения используют специальный прибор, физический принцип работы которого основан на электро-индуктивном методе, заключающемся в возбуждении в испытываемой детали переменным магнитным полем вихревых токов и регистрации обратного воздействия этих токов на рабочий и эталонный датчики. Контроль качества пайки – это метод сравнения с эталоном. Во время контроля рабочий датчик поочередно помещают на проверяемое соединение и наблюдают за пиковыми значениями. Качество паяного соединения оценивается по расхождению значений пиков в делениях шкалы. Критерий качества пайки устанавливается для каждого типа машин статистическим методом.

В статье описывается опыт контроля паяных соединений стержневых обмоток статоров гидрогенераторов типа СВ1-1500/200-88. Контролю подверглись семь опытных гидрогенераторов (ОГ) номинальной мощностью 125,5 МВт, находящихся в эксплуатации, имеющих косвенное охлаждение обмотки. Обмотка ОГ № 1 отработала 43 года, ОГ № 2 – 38 лет, ОГ № 3 – 32 года, ОГ № 4 – 39 лет, ОГ № 5 – 39 лет, ОГ № 6 – 41 год, ОГ № 7 – 40 лет. Контроль проводился во время текущего ремонта с частичной разборкой конструктивных узлов: снятием рифлёного покрытия, верхних и нижних воздухоразделяющих щитов,

перегородок и коробов для удобства доступа к лобовым частям. Всего обмотка статора гидрогенератора имеет 1608 паяных соединений лобовых частей. При этом в нижних лобовых частях гидрогенератора – 756 штук, в верхних лобовых частях – 852 штук, из них 660 стержней спаяны между собой, 192 стержней спаяны с соединительными шинами. Результаты сравнительного анализа экстремумов и средних показателей монолитности паяных соединений обмоток статоров исследуемых гидрогенераторов приведены на рис. 1; результаты количественного анализа показателей монолитности паяных соединений обмотки статора по каждому генератору – на рис. 2.

По результатам сравнительного анализа паяных соединений нижних и верхних лобовых частей семи стержневых обмоток статоров гидрогенераторов выявлено, что наибольшее значение монолитности ПС составляет 100 %; средние значения монолитности по верхним и нижним лобовым частям всех гидрогенераторов находятся в диапазоне 63 – 84,9 %. Наименьшие значения монолитности ПС находятся в диапазоне 32 – 50 %. Наименьшее значение монолитности по всем семи гидрогенераторам (32 %) соответствует верхней торцевой зоне гидрогенератора среди паяных соединений верхних лобовых частей опытного генератора № 3.

По результатам количественного анализа показателей монолитности паяных соединений обмотки статора по каждому генератору установлено, что наиболее качественная пайка стержней статора с хорошей монолитностью выполнена на опытных генераторах № 1 и № 2 и составляет 78 и 82,96 % от общего количества соединений, при малом проценте соединений с неустановленной монолитностью 4,4 и 5,53 %.

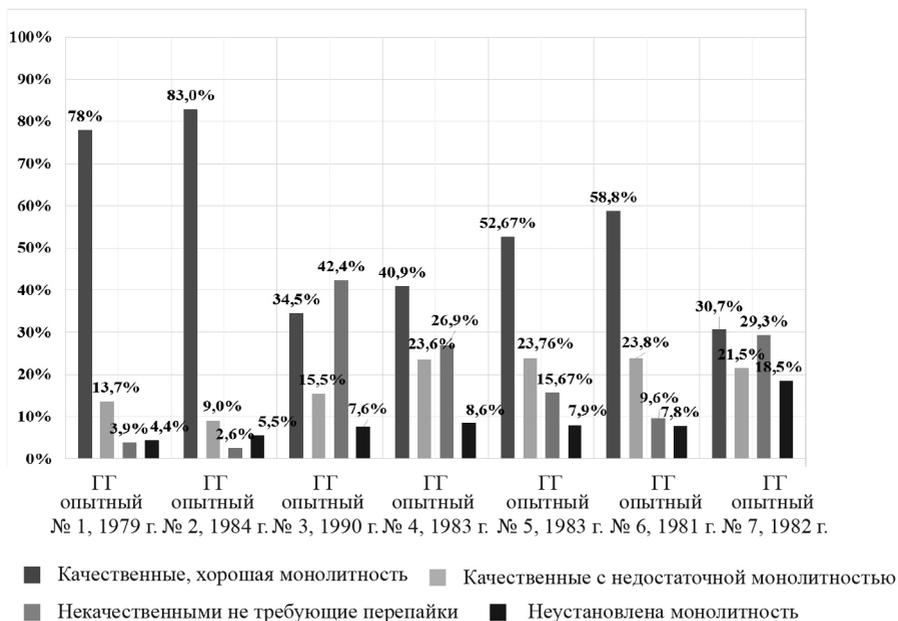
Паяные соединения стержней обмотки опытных генераторов № 3 и № 7 имеют высокий процент некачественных соединений (42,4 и 29,3 % от общего количества соединений, при этом соотношение некачественных к качественным соединениям составляет 84,8 и 56,3 %, соответственно).

Паяные соединения опытных генераторов № 4, № 5 и № 6 преимущественно являются качественными, с хорошей монолитностью соединений стержней, при этом они имеют самый высокий по сравнению с другими генераторами процент неустановленной монолитности соединений – 8,6, 7,9 и 7,8 %, соответственно.

Таким образом, среди обследованных гидрогенераторов 28,5 % име-



**Рис. 1.** Сравнительный анализ экстремумов и средних показаний монолитности паяных соединений обмоток статоров исследуемых гидрогенераторов



**Рис. 2.** Количественный анализ показателей монолитности паяных соединений обмотки статора по каждому генератору

ют некачественную пайку соединений; 28,5 % – качественную пайку с хорошей монолитностью; 43 % – качественную с недостаточной монолитностью.

Вихретоковый способ контроля позволяет получить достаточное количество данных для анализа состояния паяных соединений обмотки статора. Для контроля текущего состояния оборудования на электростанции необходимо не только увеличить количество контролируемых генераторов, но и периодически проводить обследования для возможности сравнения результатов обследования паяных соединений между генераторами и изучения динамики ухудшения монолитности паяных соединений, приводящим к отказу обмотки.

### **Список литературы**

1. РД 34.45-51.300-97. Объём и нормы испытания электрооборудования. Под общей редакцией Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Ммиконянца. М.: НЦ ЭНАС, 1998.

2. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ СИНХРОННЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

*Плыткевич В.В.; Кузьмичёв В.А.*

*Москва, «НИУ «МЭИ»*

Уровень вибрации гидрогенератора – важный показатель технического состояния, на основании которого делаются выводы о надёжной и долгосрочной работе электрооборудования на ГЭС. Измерение вибрации до и после каждого капитального ремонта является обязательной частью испытаний гидрогенератора, а её непрерывный мониторинг обеспечивает постоянный контроль уровня вибрации в процессе эксплуатации оборудования.

При работе гидроагрегата возникают силы различного происхождения, проявляющиеся в виде вибрации основных узлов гидрогенератора: обмотки статора и активной стали. Повышенные уровни вибрации обмотки статора могут возникать из-за ослабления крепления обмотки в пазах и приводить к трещинам и расслоениям изоляции, поломкам элементарных проводников, ослаблению и обрыву бандажных вязок, смещению и выпадению бандажных прокладок лобовых частей обмоток статора. Повышенные вибрации активной стали статора приводят к трещинам и повреждениям активной стали в пазах, истиранию лакового покрытия, смещению вентиляционных распорок, трещинам, обрывам и обломам тяжёлых шпилек, сварных швов конструктивных элементов, «ласточкиных хвостов» сердечника [1]. Кроме повреждений, вызванных механическими воздействиями, могут возникать повреждения, вызванные электрическими и тепловыми процессами, являющимися следствием повышенной вибрации. Для генераторов, находящихся длительное время в эксплуатации, характерно возникновение местного ослабления прессовки сердечника статора, которое может привести к потере продольной устойчивости и образованию волны в результате чрезмерных вибрационных и тепловых воздействий.

Электромагнитные силы, действующие в воздушном зазоре между статором и ротором, имеют характер вращающихся или пульсирующих

волн, уровень которых зависит от конструктивных и расчетных параметров и электромагнитных нагрузок [2].

Динамическая модель для исследования низкочастотных колебаний и колебаний частотой 100 Гц представляет собой сосредоточенные массы, связанные между собой упругими безынерционными элементами. Колебания, возбуждаемые силами, определяют динамическую прочность элементов конструкции машины и несут с собой подавляющую долю колебательной энергии. Они хорошо распространяются на большие расстояния из-за слабого демпфирования. Уровень вызываемой электромагнитными силами вибрации в основном зависит от характеристик статора как колебательной системы [3]. Упрощенная модель статора представляет собой одномассовую колебательную систему (рис. 1).

Для определения вибрационных характеристик гидрогенератора (виброскорости, виброускорения и виброперемещения) сначала необходимо провести расчёты индукции в воздушном зазоре, позволяющие определить возмущающие силы, действующие на цилиндрический статор и рассчитать колеблющиеся массы. Затем необходимо выполнить расчёты параметров вибрации, возбуждаемой основной волной поля возбуждения и дробными гармониками МДС статора. Кроме того, необходимо выполнить расчёты параметров вибрации, возбуждаемой результирующим полем основной волны.

В статье рассмотрен гидрогенератор типа СВ2-1500/200-88 мощностью 115 МВт, с внешним диаметром статора 15 м, числом зубцов 756, числом катушек 1 512, числом пар полюсов, равным 44, и дробным числом пазов на полюс и фазу, равным 219/22. Высота ярма магнитопровода с учётом шихтовки и вентиляционных каналов составляет 160 мм. Для расчета возмущающих сил выполнено моделирование одного сектора поперечного сечения гидрогенератора, выполняемое в программе конечно-элементного моделирования Femm. Распределение плотности тока на фрагменте расчетной модели сектора гидрогенератора пред-

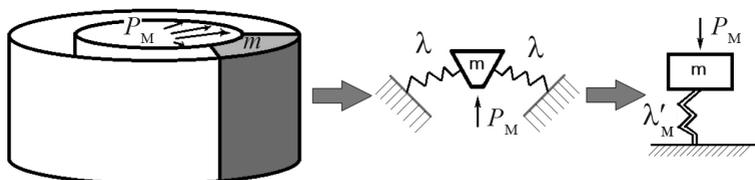
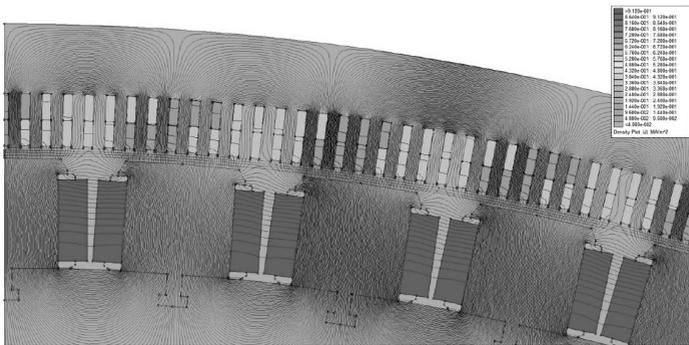
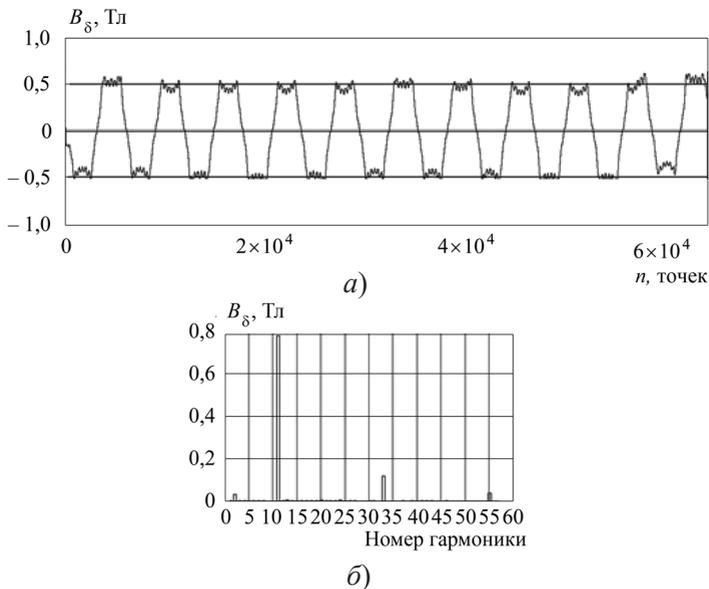


Рис. 1. Представление статора электрической машины как колебательной системы



**Рис. 2.** Картина плотности тока при активной нагрузке

ставлено на рис. 2. Для определения распределения магнитной индукции в воздушном зазоре был выполнен гармонический анализ полученных осциллограмм для определения наибольших значений амплитуд пространственных гармоник магнитной индукции в зазоре. Пример полученного распределения магнитной индукции и его гармонический анализ представлен на рис. 3. Далее по этим значениям определяются электромагнитные силы, действующие на статор и ротор.



**Рис. 3.** Распределение магнитной индукции в пазу при индуктивной нагрузке и номинальном токе якоря (а) и гармонический состав поля для 11 периодов поля (б)

Расчёт колеблющейся массы выполнен в соответствии с методикой [3]:  
 – ширина магнитопровода статора (с учётом пазов)

$$H_{\text{мп.ст}} = \left( \frac{D}{2} - \frac{D_i}{2} \right) = 35 \text{ см};$$

– ширина ярма статора (без учёта пазов)

$$H_{\text{ярма}} = H_{\text{мп.ст}} - \left( a \cdot \frac{k_{\text{стержня}}}{2} \right) = 31,192 \text{ см};$$

– активная длина ярма

$$l_a = H_{\text{ярма}};$$

– средний радиус ярма

$$R_{\text{с1}} = \frac{D}{2} - \frac{l_a}{2} = 734,404 \text{ см}.$$

– колеблющаяся масса (масса, приходящаяся на 1 см<sup>2</sup> средней цилиндрической поверхности статора)

$$m_{\text{с1}} = \frac{M_{\text{с}}}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{с1}} \cdot l_a} = 2,501 \text{ кг};$$

Расчёт параметров вибрации, возбуждаемой основной волной поля возбуждения и дробными гармониками МДС статора, выполнен в соответствии с методикой [3]:

Для колебаний порядка  $r = 0$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{E \cdot h_{\text{с}}}{m_{\text{с}} \cdot R_{\text{с1}} \cdot l_a}} = 17,348; \quad \lambda_{\text{с}} = \frac{R_{\text{с}}^2}{E \cdot h_{\text{с}}} = 0,001.$$

Число волн колебаний при  $k = 1$ ;  $r_{11} = \frac{6k \cdot p}{d} = 12.$

Податливость статора  $\lambda_{\text{с12}}$  при  $\frac{r_{11} \cdot h_{\text{с}}}{R_{\text{с}}} = 0,51 < 1,$

рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{\text{с1}} = \left[ \frac{12R_{\text{с}}^4}{E \cdot h_{\text{с}}^3} \cdot \frac{r_{11}^2 + 1}{r_{11}^2 \cdot (r_{11}^2 - 1)^2} \right] = 4,35 \cdot 10^{-4} \frac{\text{см}}{\text{Н}}.$$

Резонансная частота колебаний от волн порядка  $r_{I1} = 12$

$$\omega_{01} = \left[ \frac{r_{I1}^2 \cdot (r_{I1}^2 - 1)^2}{\sqrt{r_{I1}^2 + 1}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h_c^3}{12 \cdot m_c \cdot R_c^4}} \right] = 30,327 \text{ Гц.}$$

Механическое сопротивление  $z_s$  статора при  $\omega = 2\pi f$  и  $f = 100$  Гц

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 = 628 \frac{1}{\text{с}}; \quad z_s = \omega \cdot m_c \cdot 10^{-2} - \frac{1}{\omega \cdot \lambda_{c12}}, \quad z_s = 12,04 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{см}}.$$

Расчёт параметров вибрации, возбуждаемой результирующим полем основной волны, выполнен в соответствии с методикой [3]:

– число волн колебаний:  $r_{I1} = 2 \cdot p = 88$ ;

– податливость статора  $\lambda_{c12}$

$$\lambda_{cII} = \left[ \frac{12R_c^4}{E \cdot h_c^3} \cdot \frac{r_{II}^2 + 1}{r_{II}^2 \cdot (r_{II}^2 - 1)^2} \right] = 1,473 \cdot 10^{-4} \frac{\text{см}}{\text{Н}}.$$

– резонансная частота колебаний от волн порядка  $r_{I1} = 88$

$$\omega_{01} = \left[ \frac{r_{II}^2 \cdot (r_{II}^2 - 1)^2}{\sqrt{r_{II}^2 + 1}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h_c^3}{12 \cdot m_c \cdot R_c^4}} \right] = 1647,7 \text{ Гц.}$$

– удельная возбуждающая сила

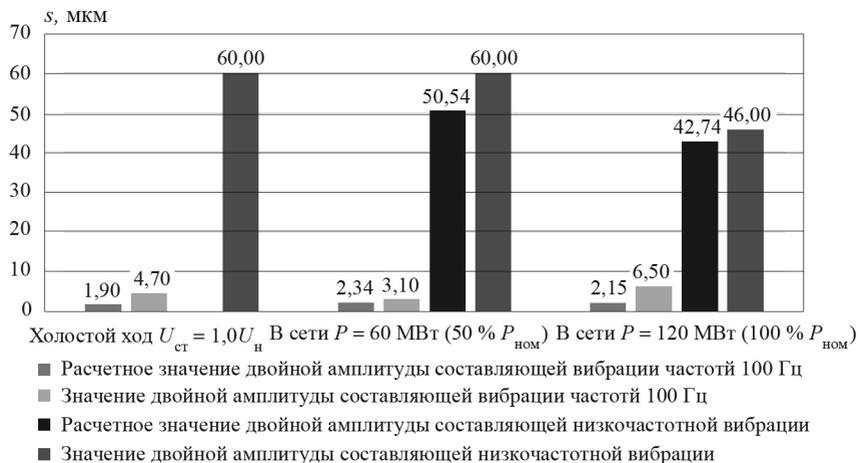
$$P_r = 40 \cdot B_{2/11} \cdot B_\delta \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}; \quad P_{rII} = 20 \cdot B_\delta^2 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2};$$

– механическое сопротивление  $z_s$  статора при  $\omega = 2\pi f$

$$z_s = \omega \cdot m_c \cdot 10^{-2} - \frac{1}{\omega \cdot \lambda_{c12}} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{см}};$$

Виброскорость, виброускорение и виброперемещение, определяют по следующим формулам:

$$v_1 = \frac{P_r}{\sqrt{2} \cdot z_s} \left[ \frac{\text{см}}{\text{с}} \right]; \quad a_1 = v_1 \cdot \omega \left[ \frac{\text{см}}{\text{с}^2} \right]; \quad s_1 = \frac{v_1}{\omega} \cdot 10^6 \text{ [мкм]}.$$



**Рис. 4.** Диаграмма вибрации ГГ от первой гармоники поля и от субгармоники

Результаты расчета сравнивались с результатами натуральных вибрационных испытаний гидрогенератора, находящегося в эксплуатации (рис. 4).

Для сравнения были выбраны следующие установившиеся режимы работы: холостой ход генератора с возбуждением, режимы с нагрузками генератора 100 и 50 % от номинальной активной мощности. Расчетные значения вибрации сердечника статора гидрогенератора по уровню вибрации с частотой 100 Гц составляет: 1,9, 2,34 и 2,15 мкм для режимов холостого хода,  $0,5P_n$  и  $P_n$ , соответственно, что составляет 40, 75 и 33 % от уровня вибрации на реальном объекте. Расчет низкочастотной составляющей на холостом ходу генератора не проводился.

Расчетное значение вибрации сердечника статора гидрогенератора по уровню двойной амплитуды низкочастотной составляющей составляет 50,54 и 42,74 мкм для режимов с нагрузками  $0,5P_n$  и  $P_n$ , соответственно, что составляет 84 и 93 % от уровня вибрации реального объекта.

Сравнительный анализ результатов вибрационных испытаний и результатов, полученных по математической модели гидрогенератора СВ2-1500/200-88 показал схожие результаты. Расхождения значений низкочастотных вибрации можно объяснить воздействием на гидрогенератор гидравлических возмущающих сил, влияние которых не учитывалось во время моделирования, и эксцентриситетом ротора гидрогенератора.

Математическая модель с элементами моделирования магнитного поля показала свою применимость для оценки вибрационного состояния сердечника статора гидрогенератора.

#### **Список литературы**

- 1 **Кожемякин В.А., Рымарь А.Н.** Гидрогенераторы: Повреждения и ремонт. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 2 **Владиславлев Л.А.** Вибрация Гидроагрегатов гидроэлектрических станций. М.: Энергия, 1972.
- 3 **Шубов И.Г.** Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТО-ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ**

**Османов С.В.<sup>1</sup>, Ляшко С.Д.<sup>1</sup>, Михайлова Т.В.<sup>1</sup>, Скороходов Е.В.<sup>2</sup>,  
Каравайников А.В.<sup>1</sup>, Кудряшов А.Л.<sup>1</sup>, Недвига А.С.<sup>1</sup>, Долгов А.И.<sup>1</sup>,  
Гусев С.А.<sup>2</sup>, Бержанский В.Н.<sup>1</sup>, Шапошников А.Н.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*КФУ им. В.И. Вернадского, Симферополь)*

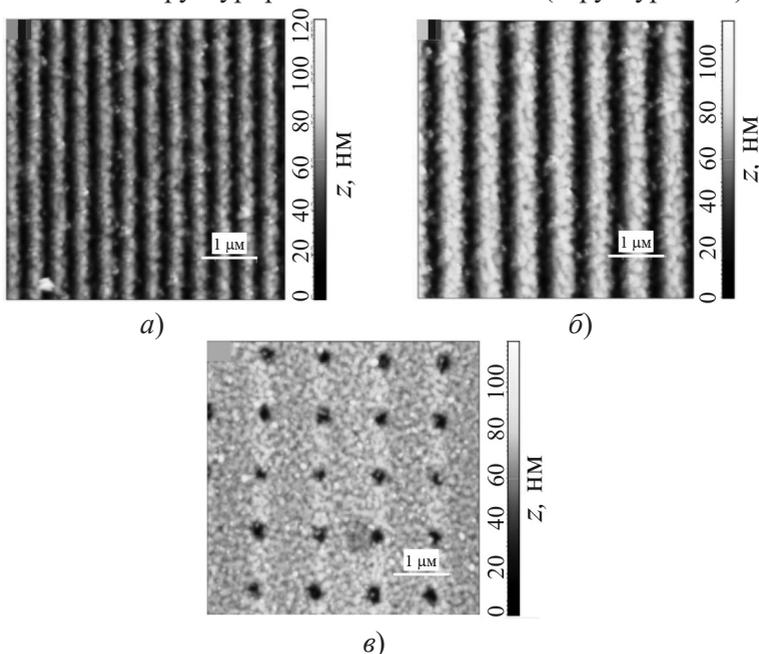
<sup>2</sup>*Нижний Новгород, Федеральный исследовательский институт  
прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)*

В последние несколько лет значительно увеличился интерес к синтезу и исследованиям различных метаповерхностей, выполненных на основе магнитных материалов. Не так давно было продемонстрировано, что оптические, магнитооптические и оптомагнитные эффекты, ранее не наблюдающиеся в непрерывных наноразмерных пленках, присутствуют в структурированных ферритах-гранатах, что открывает новые направления для применений в фотонике и спинтронике, высокоточных магнитнооптических сенсорах и устройствах хранения информации [1, 2]. Исследование и разработка методов формирования и структурирования пленок висмут-замещенных ферритов-гранатов, комплексное моделирование и экспериментальные исследования влияния структурных параметров на свойства уже структурированных пленок на сегодняшний день остаются актуальными.

В статье рассмотрены структурные, оптические и магнитооптические характеристики магнитоплазмонных структур, сформированных на предварительно структурированных пленках ферритов-гранатов различной конфигурации (меандр, нанотверстия, наноромбы). Продемонстрированы увеличение начального периода структурирования при последовательном формировании слоев структуры и оптические особенности структур.

Для формирования структур были выбраны пленки номинальных составов  $\text{Bi}_{2.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{4.2}\text{Ga}_{0.8}\text{O}_{12}$  (BiDyIG) и  $\text{Bi}_{0.9}\text{Lu}_{2.1}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (BiLuIG). В качестве подложки для синтеза были использованы монокристаллические пластины гадолиний галлиевого граната (GGG) ориентации (111) и толщиной 500 мкм. Были изготовлены три типа наноструктур:

- наноструктурированная подложка GGG/BiDyIG/Au (структура № 1);
- GGG/наноструктурированный BiDyIG/Au (структура № 2);
- GGG/наноструктурированный BiLuIG/Au (структура № 3).

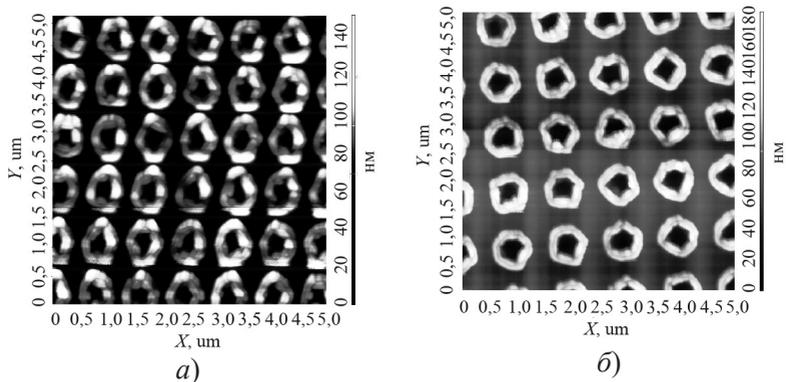


**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности слоя BiDyIG на различных структурированных участках с периодом  $P$ :  $P = 400$  нм (а),  $P = 600$  нм (б) и  $P = 1000$  нм (в)

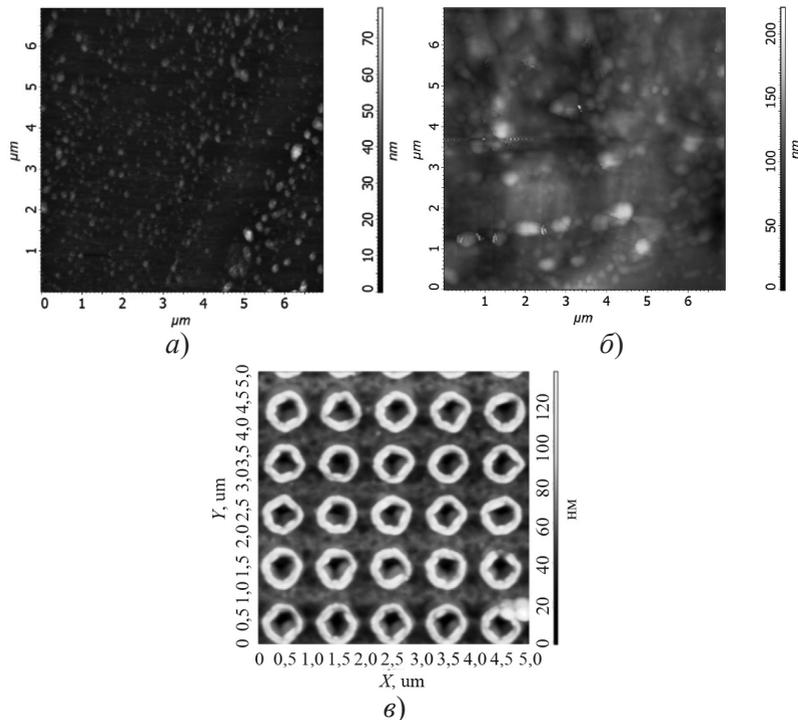
Нанесение слоя BiDyIG в структурах проводилось на установке URM 3-279.014 в кислородно-аргоновой смеси с использованием ионно-лучевого источника «Холодок-1». Слой BiDyIG кристаллизовали отжигом на воздухе при атмосферном давлении и температуре 700 °С. Продолжительность кристаллизационного отжига составляла 60 мин. Образец нагревали и охлаждали в процессе отжига постепенно, при градиенте температуры около 5 °С/мин. Для образцов № 1 и № 2 были нанесены слои толщиной 60 и 100 нм соответственно. Пленка феррита-граната BiLuIG образца № 3 толщиной 140 нм была синтезирована методом жидкофазной эпитаксии. Металлический слой структуры Au толщиной 30 нм был нанесен методом магнетронного распыления.

Формирование наноструктур на поверхности GGG и ферритов-гранатов проводилось с использованием электронно-лучевой литографии, ионного и плазмохимического травления. Для создания необходимой геометрии структур была использована комбинация позитивного резиста высокого разрешения PMMA и многослойных масок из металлических пленок V, Cu и Ta.

Для формирования структуры № 1 меандрового типа была выбрана пленка BiDyIG толщиной около 60 нм, поскольку начальное структурирование поверхности GGG имеет период  $P$  от 400 до 1000 нм и глубину 70 нм. Структурирование поверхности было выполнено в виде массивов полос и наноточек. На рис. 1 показаны полученные методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) изображения синтезированных метаповерхностей с различными геометрическими параметрами и типом структурирования подложки GGG. Кристаллизованный слой феррита-граната имеет ярко выраженную поликристаллическую структуру со средним размером зерен  $AGS = 136$  нм. Слой феррита-граната повторяет наноструктуру на поверхности подложки GGG, сохраняя исходную топологию. Аналогичная ситуация возникает после синтеза слоя Au. Однако при последовательном нанесении слоев наблюдается увеличение среднего значения периода  $P$  структуры. Согласно ближнепольно-оптическим исследованиям структуры № 1 и структурированной подложки GGG без нанесенных слоев, наибольшая интенсивность электромагнитного светового поля наблюдается в щелевых областях. Распределение интенсивности слабо зависит от поляризации падающего света на структуру.



**Рис. 2.** АСМ-изображения массива наноколец (структура №2) диаметром  $D$  и периодом  $P$ : (а)  $D = 475$  нм,  $P = 820$  нм, (б)  $D = 580$  нм,  $P = 1023$  нм



**Рис. 3.** АСМ-изображения массива наноколец (структура № 3) диаметром  $D$  и периодом  $P$ : (а)  $D = 480$  нм,  $P = 600$  нм, (б)  $D = 510$  нм,  $P = 800$  нм, (в)  $D = 600$  нм,  $P = 1000$  нм

Наноструктурирование поверхности предварительно синтезированных пленок ферритов-гранатов (образцы № 2, № 3) было выполнено в виде массивов нанодоверстий глубиной 50 нм с различным диаметром  $D$  и периодом  $P$ . На рис. 2 и 3 представлены АСМ-изображения поверхностей массивов после напыления металлического слоя Au. Видно, что структурирование поверхности граната и напыление металла привело к формированию бортиков (наноколец) на границах нанодоверстий, при этом форма сформированных наноколец отличается от круглой. Наличие наноколец вокруг нанодоверстий возможно связано с выбросом материала при формировании нанодоверстий методом плазменного травления.

Были получены спектры пропускания и спектры угла вращения плоскости поляризации света структур. В спектрах структуры № 1 в виде массива нанополос с  $P = 600$  нм было выделено три характерных резонанса при 634, 675 и 815 нм. Наиболее выраженный резонанс наблюдается при длине волны 675 нм, который характеризуется увеличением на 20 % коэффициента пропускания и появлением значительной разницы во вращениях в противоположных полях.

*Обработка методики электронно-лучевой литографии с целью получения одномерных и двумерных структур осуществлялась с использованием технологического и аналитического оборудования ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур». Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-72-20154).*

### **Список литературы**

1. Ignatyeva D.O., Karki D., Voronov A.A., Kozhaev M.A., Krichevsky D.M., Chernov A.I., Levy M., Belotelov V.I. All-dielectric magnetic metasurface for advanced light control in dual polarizations combined with high-Q resonances // Nature communications. 2020. Vol. 11.
2. Ignatyeva D., Ozerov V., Hamidi M., Chernov A., Belotelov V.I. Optical excitation of spin waves in all-dielectric nanostructured materials with iron garnet // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2300.

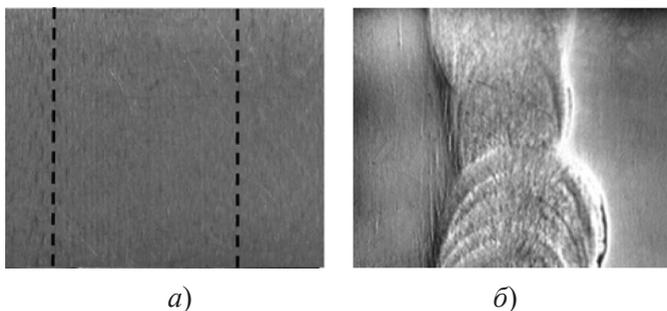
# ПЕРЕНОСНОЙ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДЕФЕКТОСКОП С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*Луговской Н.В., Лагунов И.М., Бержанский В.Н.*

*КФУ имени В.И. Вернадского*

Одним из методов неразрушающего контроля качества изделий является магнитооптическая вихретоковая интроскопия [1], которая позволяет определять скрытые неоднородности металлических изделий в приповерхностной зоне посредством визуализации и последующего анализа пространственно-неоднородных магнитных полей, возникающих на различных дефектах. На рис.1 в качестве примера такой визуализации представлены оптическое и магнитооптическое изображения дефекта сварного шва в изделии из нержавеющей стали, практически невидимого при обычной визуализации [2].

Большинство технологических и научных экспериментальных установок, основанных на данной методике, представляют собой набор стационарных классических приборов и устройств: регулируемый блок питания; генератор, частотомер, силовой блок индукторов, оптическая скамья, видеокамера, стробоскоп и персональный компьютер. Несмотря на то, что в отдельных случаях некоторые функциональные узлы магнитооптического вихретокового интроскопа (МОВТИ) выполнены в совмещенном варианте, реально применять такую «приборную стой-



**Рис. 1.** Оптическое (а) и магнитооптическое вихретоковое (б) изображения сварного шва в отшлифованном изделии из нержавеющей стали

ку» возможно только в лабораторных условиях. Функциональная схема и принцип работы такого МОВТИ описаны в [2].

Исследование и выявление приповерхностных дефектов изделий особенно актуальны при контроле текущего качества изделий в выездных, экспедиционных и военно-полевых условиях, что требует значительного уменьшения массы и габаритов МОВТИ при сохранении его остальных параметров, близких к лабораторному образцу.

Учитывая необходимость в мобильном МОВТИ (с качественной визуализацией дефектов [3]) непосредственно на месте проведения исследований, а также адаптивное управление его электротехнической и магнитооптической частями было принято решение о разработке переносного магнитооптического вихретокового интроскоп-дефектоскопа с микропроцессорным управлением, совместив все его перечисленные функциональные узлы в одном приборе.

С учетом имеющегося опыта в области магнитооптической вихретоковой интроскопии [4] для переносного варианта прибора были выбраны следующие основные параметры работы его блоков (достаточные для мобильных приложений):

- амплитуда переменного напряжения на индукторе, 5 – 50 В;
- амплитуда переменного тока индуктора (максимальная) – 3,5 А;
- частота переменного тока индуктора, 1 – 100 кГц;
- рабочая площадь обнаружения дефектов, 15×15 мм;
- постоянный ток катушки подмагничивания, – 2 – + 2 А;
- напряженность поля подмагничивания пленки сенсора, 0 – 4 Э.

В качестве сенсора использована монокристаллическая пленка висмут содержащего феррита-граната  $(\text{BiLuYNd})_3(\text{FeGaAl})_5\text{O}_{12}$ , обладающая выраженным эффектом Фарадея и одноосной магнитной анизотропией [3].

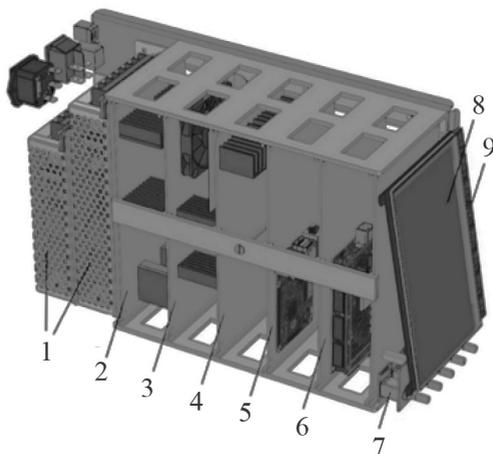
Конструктивно переносной МОВТИ состоит из двух блоков – электротехнического и магнитооптического. В состав каждого блока входит микропроцессорный модуль и локальный цветной жидкокристаллический дисплей. Электротехнический блок МОВТИ представляет собой переносной прибор (с верхней ручкой, форм-фактор 36×22×13 см), соединенный кабелем с подвижным магнитооптическим блоком, (форм-фактор 8×13×10 см). Выносной магнитооптический блок передвигается оператором по исследуемой поверхности изделия. При обнаружении дефекта оператор осуществляет фото-

или видеофиксацию выбранного участка поверхности (размер окна 15×15 мм).

Концепция работы с переносным МОВТИ заключается в том, что оператор передвигается возле протяженного исследуемого объекта (например, крыла самолета) с двумя переносными блоками, причем более тяжелый электротехнический блок может быть установлен стационарно вблизи выбранного участка исследуемой поверхности (на расстоянии до 1,5 м), а более легкий подвижный магнитооптический блок передвигается оператором по самой исследуемой поверхности в поисках дефектов.

На рис. 2 показана внутренняя структура прототипа электротехнического блока МОВТИ (3D-модель, инженерная сборка с точностью проработки основных деталей и их позиционирования в пространстве не хуже 0,01 мм). На рис. 2 выделены следующие функциональные узлы электротехнического блока:

1. блоки питания МОВТИ (первичные AC-DC преобразователи);
2. модуль программно-управляемых DC-DC преобразователей для различных узлов МОВТИ (вторичные преобразователи);
3. силовой модуль программно-управляемого широтно-импульсного модулятора ШИМ первого индуктора (для основных видов работ, без вращения магнитного поля в плоскости пленки-сенсора);
4. силовой модуль программно-управляемого ШИМ второго индуктора (при вращении магнитного поля в плоскости пленки-сенсора), а так-



**Рис. 2.** Электротехнический блок МОВТИ (3D-модель)

же программно-управляемого тока катушки подмагничивания пленки;

5. мультимедийный модуль микрокомпьютера (на базе микроконтроллера с ядром ARM) для отображения дефекта на дисплее электротехнического блока (а также первичной обработки изображения, хранения данных и т.д.);

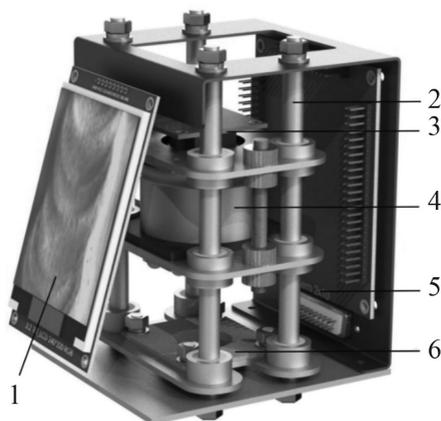
6. модуль управления силовой частью электротехнического блока (на базе многофункционального микроконтроллера; связующее звено между микрокомпьютером и силовой частью, обрабатывающее локальные алгоритмы работы отдельных узлов электротехнического блока по внутренним интерфейсам обмена информацией, согласно общей концепции работы МОВТИ и действий оператора);

7. энкодеры (5 шт.) для оперативной ручной регулировки отдельных параметров МОВТИ в процессе выполнения работы;

8. цветной семидюймовый жидкокристаллический сенсорный дисплей, предназначенный не только для качественного отображения дефекта, но и для первичной обработки изображения с целью его оперативного анализа, а также работы с различными режимами и меню МОВТИ (например, изменения или коррекции алгоритма работы);

9. сенсорные QTouch поля (8 шт., аналог быстрых кнопок) для манипуляций с алгоритмом работы прибора.

На рис. 3 показана внутренняя структура прототипа магнитооптического блока МОВТИ (3D-модель). На этом рисунке выделены следующие функциональные узлы магнитооптического блока:



**Рис. 3.** Магнитооптический блок МОВТИ (3D-модель)

1. цветной жидкокристаллический дисплей (3,2 дюйма), предназначенный для оперативного поиска и локального отображения дефекта с целью более точного позиционирования магнитооптического блока на поверхности изделия (окна сенсора); этот блок может быть удален от электротехнического блока на расстояние до 1,5 м;

2. оптическая скамья для регулировки позиционирования отдельных частей магнитооптического блока вдоль главной оптической оси;

3. видеокамера, предназначенная для получения изображения с поверхности магнитной пленки-сенсора и дальнейшего его отображения на локальном дисплее блока (удобно для поиска), с последующей передачей изображения в электротехнический блок;

4. оптический конденсор с поляризационными фильтрами и кольцевым светодиодным стробоскопом;

5. модуль управления работой магнитооптического блока (на базе быстродействующего микроконтроллера);

6. индуктор (катушка индуктивности, создающая переменное, а при необходимости и постоянное магнитное поле перпендикулярно плоскости пленки-сенсора).

В настоящий момент прототип переносного магнитооптического вихретокового интроскопа проходит тестовые испытания и опытно-конструкторскую доработку, а также разработку эргономического и торгово-привлекательного дизайна. В дальнейшем планируется расширить функциональность рассматриваемого МОВТИ, а именно:

– разработать и изготовить второй магнитооптический блок для работы с двумя, перпендикулярно расположенными индукторами (для создания и вращения магнитного поля в плоскости пленки-сенсора, что заранее предусмотрено аппаратной частью электротехнического блока);

– ввести автоматическое распознавание дефектов, согласно их сравнения с изображениями дефектов, находящихся во внутренней базе данных (модуль микрокомпьютера электротехнического блока);

– ввести автоматическую и программно-регулируемую фокусировку изображения дефекта (добавив микродвигатели в магнитооптический блок);

– усилить вандалоустойчивость всего МОВТИ (для работы в военно-полевых условиях).

Таким образом, рассмотренный переносной магнитооптический вихретоковый интроскоп является перспективным прибором бескон-

тактного неразрушающего контроля качества изделий и рекомендуется не только в целях импортозамещения, но и в целях импортоопережения подобных устройств.

### Список литературы

1. **Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий.** Справочник. Кн. 2. Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986.
2. **Vishnevskii V., Berzhansky V., Mikhailov V. et al.** // Solid State Phenomena. 2013. Vol. 200.
3. **Lugovskoy N.V., Berzhansky V.N., Semuk E.Yu., Lyashko S.D., Shaposhnikov A.N., Evtukhova E.A., Mikhailova T.V.** Magneto-optical properties of easy-plane and easy-axis garnet ferrite films for eddy current testing // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1410.
4. **Патент РФ №2753839.** Устройство для магнитооптической визуализации дефектов в электропроводящих материалах и их автоматической фиксации / Луговской Н.В., Бержанский В.Н., Лагунов И.М. 2021.

## МАШИНЫ ВЕРНЬЕ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

*Конюшенко Е.В., Молоканов О.Н., Курбатова Е.П., Курбатов П.А.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Для получения электроэнергии в значительной мере используют углеводородное и ядерное топливо, но эти виды топлива являются невозобновляемыми, и их использование, а также отходы загрязняют окружающую среду. Точный запас невозобновляемых ресурсов не известен, поэтому значительные усилия направлены на развитие альтернативных и экологически чистых источников энергии. Одним из таких источников является ветроэнергетика.

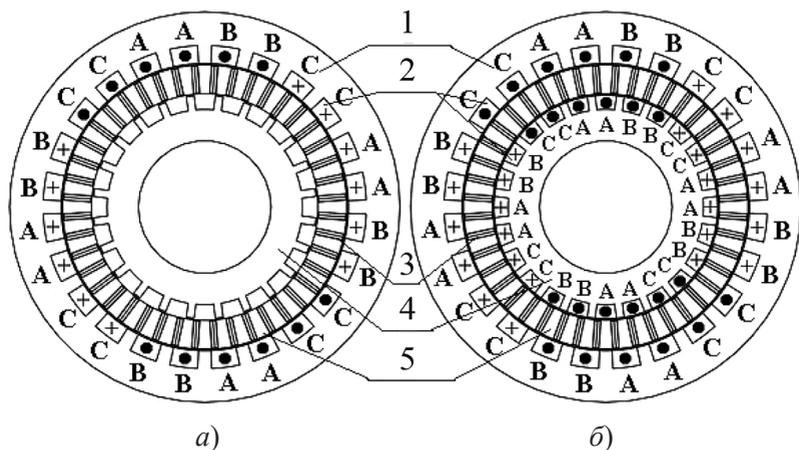
Перспективным направлением развития ветроэнергетики является применение электрической машины Вернье [1 – 5]. Принцип действия машины Вернье основан на модуляции магнитного потока; эти машины преобразуют скорость вращения магнитного поля относительно скоро-

сти вращения ротора [1], следовательно, имеют свойства электромагнитного бесконтактного мультипликатора.

Для создания магнитного поля в машинах Вернье используют постоянные магниты (ПМ). Недостатками таких машин являются добавочные потери в постоянных магнитах, что связано с модуляцией магнитного поля и, как следствие, образованием широкого спектра пространственных гармоник в воздушном зазоре. Недостатком ПМ является их высокая стоимость. Следовательно, актуальным остается создание магнитной системы с минимальным объемом ПМ.

В докладе рассматриваются конструкции генератора Вернье с азимутально намагниченными постоянными магнитами, отличающиеся достаточно высокими энергетическими показателями и малыми потерями в ПМ. Исследование показало, что с использованием азимутально намагниченных постоянных магнитов снижается их стоимость и массогабаритные показатели, но увеличивается их количество. Также проводится моделирование стационарного магнитного поля и динамического режима работы для двух типов конструкции – с обмоткой на внешнем статоре и с дополнительной обмоткой на внутреннем статоре.

Рассматриваемые конструкции состоят из двух статоров и ротора, расположенного между ними (рис. 1). Внутренний и внешний статоры имеют смещение на половину зубцового шага. Ротор представляет



**Рис. 1.** Конструкция машин с одной (а) и двумя (б) обмотками: внешний статор (1); обмотки (2); магниты (3); внутренний статор (4); ротор (5)

собой полый цилиндр из магнитомягкого материала с отверстиями, в которых установлены постоянные магниты со знакопеременной и азимутальной намагниченностью; ПМ имеют призматическую форму.

Машины Вернье имеют высокую индуктивность, поэтому для более эффективного отбора мощности предусмотрена компенсация реактивной мощности последовательно включенными конденсаторами.

Магнитное поле, созданное ПМ, концентрируется в стальных вставках

*Таблица 1*

**Основные параметры машины Вернье**

Внешний диаметр, мм	200,0
Внутренний диаметр внешнего статора, мм	165,6
Внутренний диаметр внешнего статора по зубцу, мм	147,2
Внешний диаметр внутреннего статора, мм	100,0
Внутренний диаметр внутреннего статора, мм	68,0
Внешний диаметр ротора, мм	145,6
Внутренний диаметр ротора, мм	116,0
Воздушный зазор между ротором и статорами, мм	0,8
Размеры постоянных магнитов, мм	120×35×8
Длина, мм	120,0
Внешний диаметр внутреннего статора по зубцу, мм	114,4

ротора. Основные параметры машины Вернье представлены в табл. 1.

Материал ПМ – N45SH, остаточная намагниченность – 1,31 Тл, плотность тока в обмотках – 3,7 А/мм<sup>2</sup>.

Для двух конструкций машины Вернье получены значения индуктивности, взаимной индуктивности катушек и потокосцепления, которые рассчитаны при помощи численного моделирования для стационарного магнитного поля. Эти параметры показаны в табл. 2.

Модель машин Вернье в MATLAB/Simulink представлена на рис. 2, она включает в себя три источника ЭДС, которые индуцируются в обмотках. Количество обмоток подбирается так, чтобы ЭДС генератора была равна фазному напряжению энергосистемы. Частота вращения ротора – 600 об/мин.

## Полученные параметры машины Вернье

Параметр	Значение параметра для машины	
	с обмоткой на внешнем статоре	с дополнительной обмоткой на внутреннем статоре
Индуктивность, мГн	12,65	14,05
Магнитный поток, мВб	4,54	5,2
Взаимная индукция, Гн	4,75	5,5
Количество обмоток	50	45
Активное сопротивление, мОм	95,3	189,3
Фильтрующая емкость, мкФ	11,57	12,72
Нагрузка, Ом	32	32

Модель построена при следующих допущениях:

- собственная и взаимная индуктивности обмоток не зависят от тока, поля возбуждения постоянных магнитов и угла нагрузки;
- ЭДС не зависит от токов в обмотки и равна значению, соответствующему режиму холостого хода;
- незначительный сдвиг фазы между внешним и внутренним ротором не учитывается;
- взаимная индуктивность между внешней и внутренней обмотками не учитывается.

Было проведено исследование двух конструкций машины Вернье, а также разработана модель в MATLAB/Simulink, которая позволяет исследовать различные режимы работы и может быть использована при

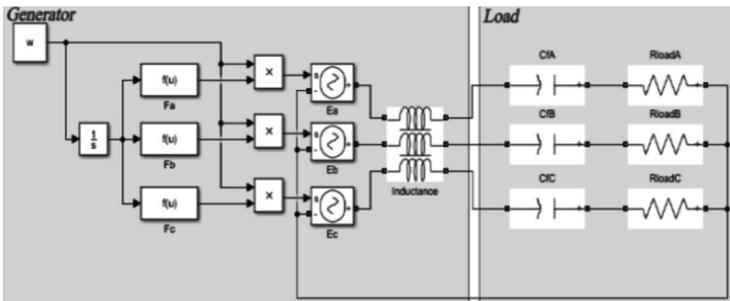


Рис. 2. Модель машин в MATLAB/Simulink

проектировании генератора. Выходная мощность при согласованной нагрузке для машины Вернье с обмоткой на внешнем статоре равна 5,57 кВт, для машины с обмоткой на внешнем и внутреннем статоре – 7,69кВт.

Выходная мощность машины Вернье с обмоткой на внешнем и внутреннем статоре равна 9,887 кВт при плотности тока примерно 2,2 А/мм<sup>2</sup> и 11,904 кВт при плотности тока примерно 2,6 А/мм<sup>2</sup> при компенсации реактивной мощности.

Моделирование показало также, что полная компенсация реактивной мощности для рассматриваемых машин нецелесообразна из-за очень высокой плотности тока в обмотках (до нескольких десятков А/мм<sup>2</sup>), что вызывает их перегрев. По этой причине для каждой машины определяется рабочая емкость и соответствующая согласованная нагрузка; емкость подбирается таким образом, чтобы получить плотность тока в обмотках приблизительно равную 2,6 А/мм<sup>2</sup>.

#### **Список литературы**

1. **Li J., Chau K.T., Jiang J. Z., Liu C., Li W. A.** New Efficient Permanent-Magnet Vernier Machine for Wind Power Generation // IEEE Transactions on Magnetics. 2010. Vol. 46. № 6.
2. **Tlali P.M., Wang R., Gerber S.** Comparison of PM Vernier and Conventional Synchronous 15 kW Wind Generators / XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2018.
3. **Wang L.L., Shen J.X., Wang Y., Wang K.** A novel magnetic-g geared outer-rotor permanent-magnet brushless motor / 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008.
4. **Zhou Y., Gao Y., Qu R., Cheng Y., Shi C. A.** Novel Dual-Stator HTS Linear Vernier Generator for Direct Drive Marine Wave Energy Conversion // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. Vol. 29. № 5.
5. **Khaliq S., Zhao F., Kwon B.** Design and analysis of a dual stator spoke type linear vernier machine for wave energy extraction / IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), 2015.

# ВЫБОР МАГНИТНЫХ СИСТЕМ РОТОРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ПОВЫШЕННЫМИ УДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*Бабицкий Д.Ю., Гейнрих Г.О., Приступ А.Г., Шевченко А.Ф.*

*Новосибирск, НГТУ*

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) являются наиболее перспективным решением в плане выбора электромеханического преобразователя в диапазоне малых и средних мощностей. Двигатели такого типа конструктивно просты и надёжны, имеют абсолютно жёсткие механические характеристики, не требуют затрат энергии на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью и высоким быстродействием в переходных процессах. Отличительной особенностью таких двигателей является высокий удельный момент. Пожалуй, по этому показателю им нет равных среди других двигателей. При перегрузке сила, снимаемая с единицы поверхности ротора статора, достигает значений  $10 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ .

Конфигурация ротора СДПМ, число полюсов, тип и объём постоянных магнитов напрямую влияют на выходные характеристики электродвигателя. Кроме того, ими определяется степень проявления негативных эффектов, таких, как добавочные потери, пульсации электромагнитного момента, электромагнитные шумы и вибрации.

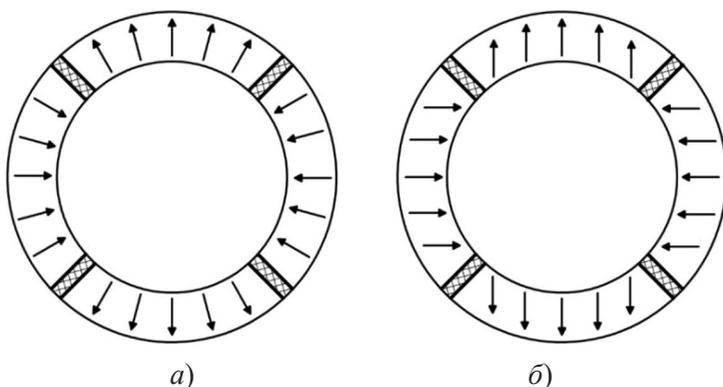
Объём постоянных магнитов, помимо энергетических показателей, во многом определяет и стоимость изготовления электрической машины. Также перед разработчиками может быть поставлена задача достижения высокой мощности электрической машины в ограниченных габаритах. Таким примером может служить электрический двигатель погружного насоса для отбора нефтеносной пластовой жидкости при эксплуатации в составе скважинных установок. Диаметр двигателя в этом случае ограничен размерами обсадной колонны нефтяной скважины.

Ввиду вышеперечисленных обстоятельств использование постоянных магнитов внутри объёма электрической машины должно быть максимально рациональным.

Один из самых распространённых типов ротора – с радиальным расположением постоянных магнитов; его преимущества – малые значения индуктивностей по продольной и поперечной осям. При проектировании СДПМ с таким типом ротора разработчики, как правило, выбирают число полюсов, высоту и длину дуги магнита, а также его марку, обуславливающую уровни остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы, его максимальную рабочую температуру и температурный коэффициент.

Однако зачастую упускается тип намагничивания, характеризующий направление вектора магнитной индукции в объеме постоянного магнита. Тем не менее, в определённых условиях это свойство, как будет показано далее, может оказывать значительное влияние на характеристики электрической машины.

Производители постоянных магнитов и изготовители магнитных систем обычно применяют два основных типа намагничивания – радиально-параллельное и радиальное (рис. 1). Магнитные системы с радиально-параллельным намагничиванием проще в изготовлении; радиальное намагничивание – более сложный и дорогой технологический процесс. С другой стороны, распределение поля, близкое к тому, которое соответствует радиальному намагничиванию, может быть получено при разбиении магнита полюса на определенное число сегментов, каждый из которых намагничен радиально-параллельно, что в свою очередь, уменьшает потери в магнитах за счет наводимых в них вихревых токов.



**Рис. 1.** Радиальное (а) и радиально-параллельное (б) намагничивание постоянных магнитов

Исходя из изложенного, цель работы – исследование влияния числа полюсов и направления намагниченности постоянных магнитов на удельные характеристики СДПМ. Под характеристиками здесь понимается электромагнитный момент и, соответственно, мощность, развиваемые электродвигателем.

Электромагнитный момент СДПМ определяется произведением тока обмотки статора и основной гармоники магнитной индукции в воздушном зазоре, создаваемой постоянными магнитами. Таким образом, оценку влияния изменяемых параметров на электромагнитный момент можно оценивать косвенно через влияние этих параметров на амплитуду основной гармоники индукции в зазоре.

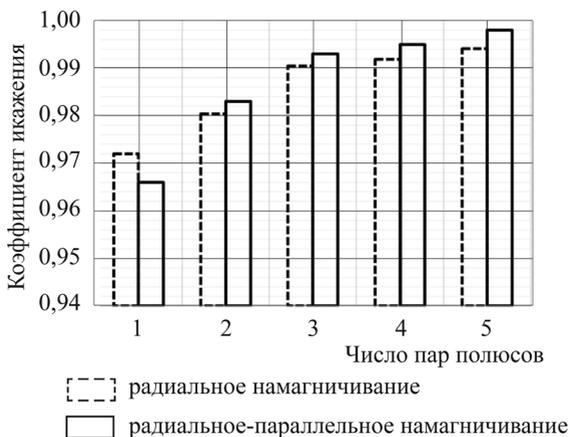
Для комплексной оценки влияния на добавочные потери в стали, пульсации момента, шумы и вибрации как на совокупность негативных эффектов, обусловленных высшими гармониками индукции в воздушном зазоре, принят коэффициент искажения синусоидальности распределения индукции в воздушном зазоре.

Расчёт магнитной индукции в воздушном зазоре проводился методом численного моделирования магнитного поля в двухмерной постановке, реализованным в программном продукте FEMM 4.2, с последующим разложением полученных кривых в ряд Фурье. Расчётные модели имеют следующие параметры:

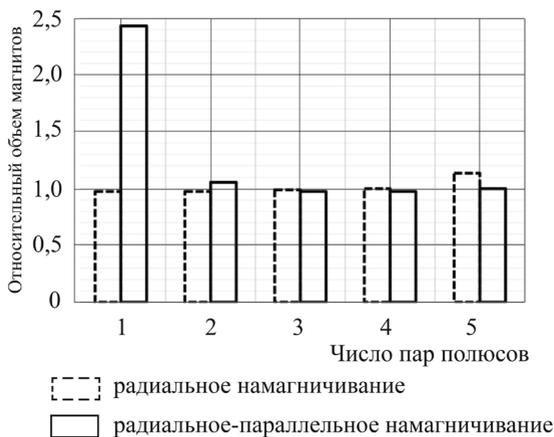
- внешний диаметр ротора 69,87 мм;
- воздушный зазор 0,5 мм;
- коэффициент полюсного перекрытия 0,75;
- статор представлен полым цилиндром без пазов с внешним диаметром 130 мм;
- число пар полюсов меняется от 1 до 5;
- высота магнитов меняется от 2 до 8 мм;
- намагничивание магнитов: радиальное и радиально-параллельное.

На основе выполненных расчётов для обоих типов намагничивания рассчитан коэффициент искажения синусоидальности распределения магнитной индукции в воздушном зазоре как отношение действующего значения основной гармоники к действующему значению всей кривой. На рис. 2 приведена зависимость усредненного значения коэффициента искажения по всем высотам магнитов.

На рис. 3 приведена зависимость относительного объёма магнитов от числа пар полюсов, обеспечивающего уровень индукции в воздуш-



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента искажения от числа пар полюсов



**Рис. 3.** Зависимость удельного объема магнитов от числа пар полюсов

ном зазоре 0,85 Тл. За базисное значение принят объём магнитов в машине с коэффициентом искажения наиболее близким к единице (рис. 2).

Как показало численное моделирование, способ намагничивания влияет и на объём магнитов, и на форму кривой магнитной индукции в рабочем зазоре электрической машины, причем на эти зависимости существенно влияет число пар полюсов машины.

Анализ полученных зависимостей показывает, что влияние способа намагничивания на общий объём магнитов, обеспечивающий требуе-

мый уровень рабочей гармоник магнитного поля в рабочем зазоре наиболее сильно проявляется в машинах низкой полюсности, он же дает некоторое преимущество при  $p > 4$ . Что касается гармонического состава создаваемого магнитного поля, то способ радиально-параллельного намагничивания позволяет получить наиболее близкую к синусоиде форму распределения магнитной индукции для машин с числом пар полюсов более единицы, а для двухполюсных машин более благоприятным оказался радиальный способ намагничивания.

Вероятно, что при учёте наличия пазов на внутренней поверхности статора и сохранении его внешнего диаметра исследованные тенденции проявятся более выразительно за счёт более сильного насыщения ярма в машинах с меньшим числом полюсов.

В связи с этим можно рекомендовать для электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов при числе пар полюсов  $p < 3$  применять магниты с радиальным способом намагничивания.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА, ПОТРЕБЛЯЕМОГО ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ, ПО ЗАДАНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

*Вырыханов Д.А.*

*Саратов, ФГОУ ВПО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.»*

К современным электроприводным системам предъявляются повышенные требования к формированию динамики движения, развиваемого силового момента или силы, развиваемой механической мощности. Этим требованиям должны отвечать системы подачи резца в высокоскоростных обрабатывающих центрах, активные электромеханические системы подавления колебаний, электроприводные системы, встроенные в контуры управления высокодинамичными летательными аппаратами. Обеспечение высокой динамики, как правило, осуществляется с применением систем непосредственного привода, в которых движение

исполнительного элемента происходит за счет взаимодействия с магнитным полем, минуя силовые механические редукторы. Одним из типов электрических двигателей, позволяющих реализовать непосредственный привод исполнительных механизмов, является линейный электромагнитный привод (ЛЭМД) [1]. При этом основными факторами, определяющим динамику электропривода, являются зависимости пространственной координаты и механической мощности от времени:

$$\begin{cases} x = f_1(t); \\ P_{\text{мех}} = f_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x$  – пространственная координата местоположения якоря ЛЭМД;  $t$  – время;  $P_{\text{мех}(x)}$  – механическая мощность, развиваемая ЛЭМД при движении якоря согласно зависимости  $x = f_1(t)$ . В свою очередь, зависимости (1) формируются за счет управления потребляемым ЛЭМД электрическим током, от значения которого зависит электромагнитное усилие, развиваемое ЛЭМД. Заданная динамическая зависимость  $i = f_3(t)$  на этапе реализации обеспечивается путем управления функцией напряжения, питающего обмотку ЛЭМД. Таким образом, задачу оптимального питания можно сформулировать в виде поиска требуемой функции тока  $i = f_3(t)$ , обеспечивающей реализацию заданных динамических функций (1).

В статье предлагается следующий алгоритм определения зависимости  $i = f_3(t)$ , исходя из заданных зависимостей (1). Последовательность расчетов иллюстрируется численными результатами расчета математической модели ЛЭМД, верифицированной результатами экспериментальных замеров [2].

Входными данными расчета являются параметры требуемой механической мощности, которую должен развить ЛЭМД, в форме динамической зависимости  $P_{\text{мех}(x)}$  и требуемой динамической функции изменения пространственной координаты  $x_{(t)}$ . Результатом расчетов (выходными данными) является зависимость  $i_{(t)}$ , определяющая требуемый режим электромеханического преобразования энергии, формирование которой должно быть осуществлено с помощью системы управления.

Вначале определим параметры динамических функций, описывающих процесс работы ЛЭМД для неуправляемого режима питания от

конденсаторного накопителя энергии – режим, верифицированный результатами экспериментальных замеров [2]. Это позволит определить исходную зависимость механической мощности от времени. Разложим в ряд Фурье следующие динамические зависимости, полученные на основе расчета математической модели:

$$i = f_3(t); \quad (2)$$

$$L = f_4(t), \quad (3)$$

где  $L$  – собственная индуктивность обмотки ЛЭМД. Принимаем независимость этого параметра от тока, то есть линейность физических свойств магнитопровода ЛЭМД:

$$\frac{di_{\text{мех}}}{dt} = f_5(t), \quad (4)$$

где  $\frac{di_{\text{мех}}}{dt}$  – некоторая функция [3], определяющая значение механической

мощности в соответствии с выражением:

$$P_{\text{мех}(t)} = i_{(t)}L_{(t)} \frac{di_{\text{мех}}}{dt}. \quad (5)$$

Разложим также зависимости тока, индуктивности и производной «механической» составляющей тока от пространственной координаты:

$$i = f_6(t); \quad (6)$$

$$L = f_7(t); \quad (7)$$

$$\frac{di_{\text{мех}}}{dt} = f_8(t). \quad (8)$$

Полученные данные справедливы при однозначном соответствии  $x = f_1(t)$ ; то есть зависимости (2 – 4) позволяют найти соответствующие зависимости (6 – 8) с помощью обратной зависимости:

$$t = f_9(x). \quad (9)$$

Описанные зависимости от времени и пространственной координаты механической мощности, а также ее составляющих согласно (5) представлены в качестве первоначальных функций на рис. 1 – 3 и в полной мере характеризуют динамику работы ЛЭМД при его питании от конденсаторного накопителя (исходный режим работы).

Допустим, необходимо сформировать иную зависимость механической мощности от времени, отличную от первоначальной функции, представленной на рис. 1. Соответственно, изменится и зависимость механической мощности от пространственной координаты (рис. 2).

В качестве примера примем, что требуемая механическая мощность определится синусоидальной функцией от времени:

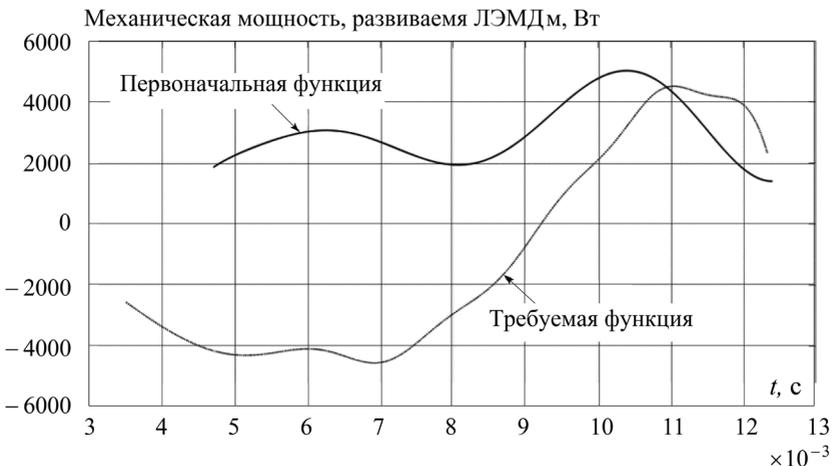
$$P_{\text{мех}(x)}^{\text{опт}} = P_{\text{мехmax}} \sin(\omega t), \quad (10)$$

где  $P_{\text{мехmax}} = 4500$  Вт – амплитуда механической мощности, развиваемой ЛЭМД;  $\omega = 220,2$  рад/с – круговая частота изменения механической мощности. Зависимость (10) в численной форме имеет вид  $P_{\text{мех(max)}}^{\text{опт}} = 4500 \cdot \sin(220,2 \cdot t)$  и представлена на рис. 2 в виде «требуемой» зависимости механической мощности от координаты.

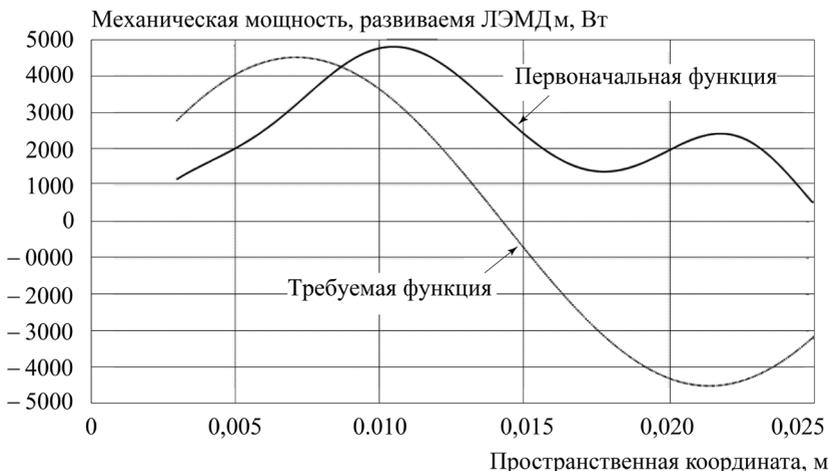
Поиск коэффициентов разложения в ряд Фурье функций (2 – 4, 6 – 8), формирующих требуемую динамику изменения механической мощности (придадим им индекс опт) проведем на основании следующих допущений:

1) зависимость  $L^{\text{опт}} = L = f_7(x)$  – в связи с неизменностью конструкции ЛЭМД;

2) зависимость  $\frac{di_{\text{мех}}^{\text{опт}}}{dt} = \frac{di_{\text{мех}}}{dt} = f_8(x)$  – в связи с предположением



**Рис. 1.** Зависимость механической мощности, развиваемой ЛЭМД, от времени



**Рис. 2.** Зависимость механической мощности, развиваемой ЛЭМД, от координаты

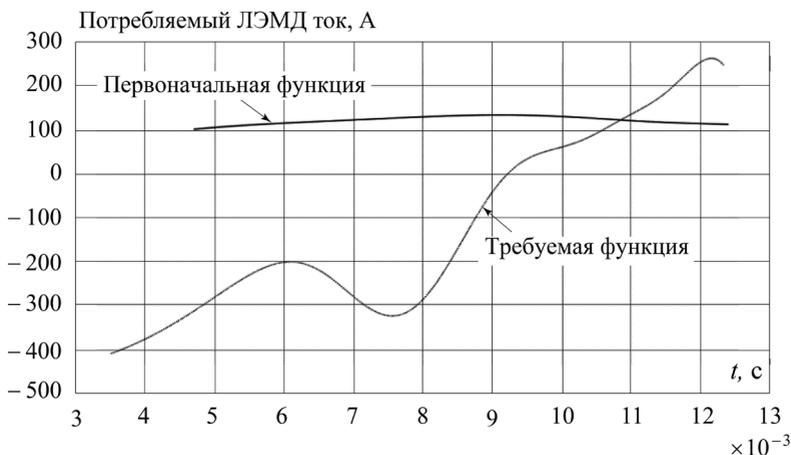
о возможности реализовать произвольную, требуемую динамическую функцию тока  $i^{\text{опт}} = f_{10}(x)$  путем изменения питающего напряжения. В общем случае, зависимость  $\frac{di_{\text{мех}}^{\text{опт}}}{dt} = f_{11}(x)$  можно принять произвольной, что в достаточно полной мере определит требуемую форму зависимости  $i^{\text{опт}} = f_{10}(x)$ .

Функцию  $i^{\text{опт}} = f_{10}(x)$  будем искать в виде ряда Фурье по первым четырем гармоникам с заданной круговой частотой первой из них  $\omega = 220,2$  рад/с. Представив выражение (5) в виде зависимости от пространственной координаты:

$$P_{\text{мех}(x)} = i_{(x)} L_{(x)} \frac{di_{\text{мех}}}{dt}_{(x)}, \quad (11)$$

численно найдем из (11) в условиях принятых допущений искомую зависимость тока от пространственной координаты в виде:

$$i_{(x)}^{\text{опт}} = \frac{P_{\text{мех}(x)}^{\text{опт}}}{L_{(x)} \frac{di_{\text{мех}}}{dt}_{(x)}}. \quad (12)$$



**Рис. 3.** Зависимости тока, потребляемого ЛЭМД от времени

Подставив в правую часть (12) численные значения соответствующих величин, после расчетов разложим функцию тока на составляющие ряда Фурье. Затем, исходя из известной функции  $t = f_9(x)$ , найдем зависимость  $i^{\text{опт}} = f_{12}(t)$ , которую разложим в ряд Фурье. Аналогично определим зависимости  $L^{\text{опт}} = f_{13}(t)$  и  $\frac{di_{\text{мех}}^{\text{опт}}}{dt} = f_{14}(t)$ .

Зависимости тока от времени для первоначального и требуемого (оптимального) режимов представлены на рис. 3.

### Выводы

Предложен алгоритм определения динамической функции тока, потребляемого ЛЭМД, обеспечивающей заданные динамические функции механической мощности и пространственной координаты местоположения якоря. Расчеты проведены в отношении переходного процесса электромеханического преобразования энергии в ЛЭМД, протекающего в некоторый заданный промежуток времени. Применение предложенного алгоритма возможно также для расчета рабочих режимов электрических машин с гармоническим характером рабочих процессов: возвратно-поступательного или вращательного вида движения.

### Список литературы

1. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Электромагнитные прессы. Новосибирск: Наука, 1978.

2. **Вырыханов Д.А., Егоров А.А., Угаров Г.Г., Усанов К.М.** Оптимизация режима конденсаторного питания линейного электромагнитного двигателя в приводе ударных машин // Вестник СГТУ. 2006. № 3.

3. **Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г.** Анализ взаимосвязей электрических контуров в обобщенном электромеханическом преобразователе энергии // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 3.

## ДОБРОТНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА В ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ С ПОТЕРЯМИ

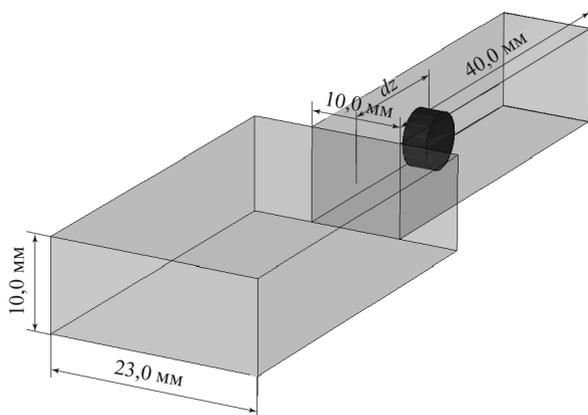
*Геворкян В. М., Казанцев Ю. А., Шутков А. В.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Рассматривается вопрос формирования эффективной собственной добротности  $Q_{\text{эфф}}$  миниатюрного открытого диэлектрического резонатора (ДР) в запредельном волноводе с потерями. Интерес к ДР в таких электродинамических системах определяется широким применением резонансных звеньев на основе ДР в запредельном волноводе для конструирования СВЧ фильтров [1], в которых одной из основных характеристик резонансных звеньев является эффективная собственная добротность. Электромагнитное поле резонатора представляется в виде суммы внутреннего поля ДР, определяющего внутреннюю собственную добротность  $Q_0 = 1/\text{tg}\delta$ , и внешнего поля ДР в линии, определяющего его внешнюю добротность  $Q_e$  [2]. Внешняя добротность, в свою очередь, определяется потерями в стенках волновода. На основе численного моделирования показано, что  $Q_{\text{эфф}}$  может быть как больше, так и меньше  $Q_0$ .

Добротность ДР в запредельном волноводе исследовалась на основе численной модели, соответствующей конструкции (рис. 1), для двух вариантов образцов ДР (табл. 1).

В обоих случаях рассмотрен медный ( $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м) прямоугольный возбуждающий волновод сечением  $23 \times 10$  мм<sup>2</sup>, переходящий



**Рис.1.** Модель ДР в запердельном волноводе

**Параметры ДР** *Таблица 1*

Резонатор	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$	$D$ , мм	$H$ , мм
ДР1	28	1/18000	5,98	2,71
ДР2	40	1/5000	4,80	2,40

в запердельный короткозамкнутый волновод размерами  $10 \times 10 \times 40$  мм. Внутри волновода располагался дисковый ДР диаметром  $D$  и высотой  $H$ , изготовленный из материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Резонансная частота  $f_p$  основного вида колебаний ДР в обоих случаях составляла приблизительно 10 ГГц. Уровень связи ДР с возбуждающим волноводом определяется расстоянием  $dz$ .

Алгоритм расчета добротности  $Q_{\text{эфф}}$  в модели (рис. 1) соответствует действиям для модели диэлектрического резонатора в короткозамкнутом волноводе [3]. В этой модели резонансным является весь рассматриваемый объем  $V$  линии с ДР. Запасенная энергия в объеме  $V$  определяется энергией внутри и вне ДР. Энергия вне ДР определяется нераспространяющимися видами волн, быстрозатухающими при удалении от ДР. Мощность потерь в объеме  $V$  определяется потерями в диэлектрике, то есть его  $\text{tg}\delta$ , и в металлических стенках линии, то есть проводимостью металла ( $\sigma$ ).

Расчет  $Q_{\text{эфф}}$  производится по известной частотной зависимости ко-

коэффициента отражения  $\underline{S}_{11}(j\omega)$  в короткозамкнутом волноводе с ДР:

$$\underline{S}_{11}(j\omega) = \left[ 1 - \frac{2\beta}{1+\beta} \underline{\kappa}(j\omega) \right] e^{-j\Psi}, \quad (1)$$

где  $\Psi$  – фазовый коэффициент, определяемый ориентацией и положением ДР в волноводе;  $\beta = P_{\text{и}}/P_{\text{т}}$  – коэффициент связи волновода с ДР по основному виду волны;  $P_{\text{и}}$  – мощность, излучаемая из объема  $V$  на резонансной частоте  $\omega_{\text{р}}$ ;  $P_{\text{т}}$  – мощность тепловых потерь в ДР и металлических стенках волновода на резонансной частоте  $\omega_{\text{р}}$ .

Частотный коэффициент  $\underline{\kappa}(j\omega)$  в (1) при  $\omega \approx \omega_{\text{р}}$  записывается в виде:

$$\underline{\kappa}(j\omega) = \left[ 1 + j \frac{Q_{\text{эфф}}}{1+\beta} \left( \frac{\omega^2 - \omega_{\text{р}}^2}{\omega_{\text{р}}^2} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{эфф}} = \omega_{\text{р}} W_3 / P_{\text{т}}$  – эффективная добротность ДР (добротность объема  $V$  с ДР);  $W_3$  – запасенная энергия электромагнитного поля в объеме  $V$ .

Эффективная добротность  $Q_{\text{эфф}}$  в соответствии с (1) и (2) может быть определена по частотной характеристике как  $Q_{\text{эфф}} = \omega_{\text{р}} / \Delta\omega$ , где  $\Delta\omega$  – ширина резонансной кривой  $S_{11}(\omega)$  по уровню половинной мощности;  $\beta$  определяется из (1) при  $\omega = \omega_{\text{р}}$ .

При  $\omega = \omega_{\text{р}}$

$$S_{11\text{р}} = \frac{|1-\beta|}{|1+\beta|}; \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1 - S_{11\text{р}}}{1 + S_{11\text{р}}}, \text{ при } \beta > 1;$$

$$\beta = \frac{1 + S_{11\text{р}}}{1 - S_{11\text{р}}}, \text{ при } \beta > 1;$$

$$\beta = 1, \text{ при } S_{11\text{р}} = 0.$$

Коэффициент отражения по уровню половинной мощности из (3):

$$S_{11}^{(0,5)} = \sqrt{\frac{1 - S_{11p}^2}{2}} = \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{1 + \beta}. \quad (4)$$

Эффективная добротность  $Q_{\text{эфф}}$  определяется формулой:

$$Q_{\text{эфф}} = \frac{\omega_p}{2\Delta\omega}(1 + \beta). \quad (5)$$

Рассмотрим выражение для добротности  $Q_{\text{эфф}}$  при разделении электромагнитного поля ДР на внутреннее и внешнее. Разобьем весь объем  $V$  линии на внутренний объем ДР  $V_{\text{вн}}$  и наружный объем  $V_{\text{нар}}$ , тогда:

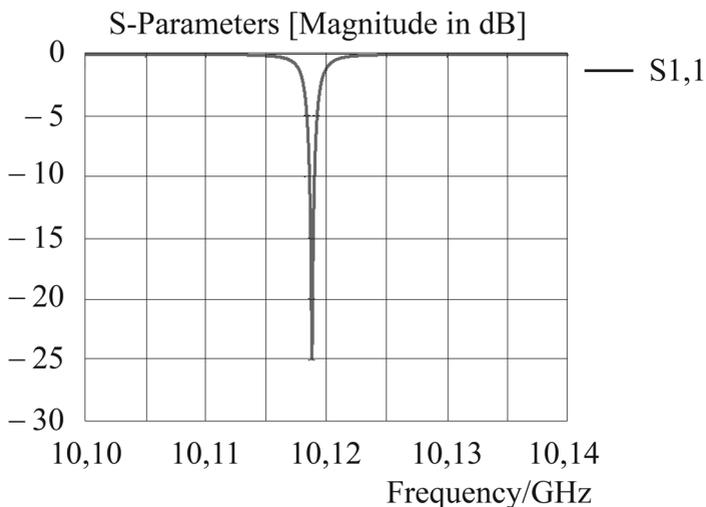
$$Q_{\text{эфф}} = \frac{\omega_p W_z}{P_T} = \frac{\omega_p (W_{z,\text{вн}} + W_{z,\text{нар}})}{P_{T,\text{вн}} + P_{T,\text{нар}}} = \frac{\omega_p W_{z,\text{вн}}}{P_{T,\text{вн}}} \left[ \frac{1 + \frac{W_{z,\text{нар}}}{W_{z,\text{вн}}}}{1 + \frac{P_{T,\text{нар}}}{P_{T,\text{вн}}}} \right] = Q_0 \left( \frac{1 + K_W}{1 + \frac{Q_0}{Q_e} K_W} \right), \quad (6)$$

где  $W_{z,\text{вн}}$  и  $P_{T,\text{вн}}$  – запасенная энергия и мощность тепловых потерь в ДР;  $W_{z,\text{нар}}$  и  $P_{T,\text{нар}}$  – запасенная энергия снаружи ДР и мощность потерь в окружающих металлических стенках волновода;  $Q_0 = \omega_p W_{z,\text{вн}} / P_{T,\text{вн}} = 1/\text{tg}\delta$  – собственная (внутренняя) добротность ДР;  $Q_e = \omega_p W_{z,\text{нар}} / P_{T,\text{нар}}$  – внешняя добротность ДР;  $K_W = W_{z,\text{нар}} / W_{z,\text{вн}}$  – коэффициент, равный отношению запасенных энергий снаружи и внутри ДР.

При высокой собственной добротности ДР ( $Q_0 \gg 1$ ) и малых потерях в металлических стенках волновода ( $\sigma \gg 1$ ,  $Q_e \gg 1$ ) структура полей в объеме  $V$  вблизи резонансной частоты ( $\omega \approx \omega_p$ ) не зависит от  $Q_0$ , отсюда  $K_W$  и  $Q_e$  также не зависят от  $Q_0$ .

Согласно (6), если  $Q_e > Q_0$ , то  $Q_{\text{эфф}} > Q_0$ , и наоборот, при  $Q_e < Q_0$  получим  $Q_{\text{эфф}} < Q_0$ ; в особом случае  $Q_0 = Q_e = Q_{\text{эфф}}$ .

Численный эксперимент проводился в среде моделирования трех-



**Рис. 2.** Частотная зависимость  $S_{11}(\omega) = |S_{11}(j\omega)|$  в модели с ДР1

мерных СВЧ структур CSTStudioSuite (StudentEdition). Число конечных элементов модели составляло около 20 000.

На рис. 2 показана экспериментальная частотная зависимость коэффициента отражения  $S_{11}(\omega) = |S_{11}(j\omega)|$  в модели с ДР1.

Результаты математической обработки численных экспериментальных частотных характеристик для моделей с ДР1 и ДР2 представлены в табл. 2.

*Таблица 2*

**Результаты математической обработки численных экспериментальных частотных характеристик**

Резонатор	$dz$ , мм	$\beta$	$f_p$ , ГГц	$Q_0 = 1/\text{tg}\delta_s$	$Q_{\text{эфф}}$	$Q_e$	$K_W$
ДР1	15,0	1,1205	10,1189	18000	16829,0	7131,4	0,0478
ДР2	11,4	1,0178	10,2134	5000	5071,0	8225,6	0,0370

Результаты численного эксперимента хорошо согласуются с формулой (6) и ее выводами. Действительно, если внешняя добротность  $Q_e$ , обусловленная энергией вне ДР и потерями в стенках волновода, меньше собственной добротности  $Q_0$ , определяемой энергией и потерями внутри ДР, то эффективная добротность ДР  $Q_{\text{эфф}}$  оказывается мень-

ше собственной (табл. 2, ДР1), и наоборот, если  $Q_e > Q_0$ , то  $Q_{\text{эфф}} > Q_0$  (табл. 2, ДР2).

Таким образом, при заданной собственной добротности  $Q_0 = 1/\text{tg}\delta$ , эффективная добротность ДР  $Q_{\text{эфф}}$  определяется значением внешней добротности  $Q_e$  и коэффициентом  $K_W$ . В запердельном волноводе  $K_W \ll 1$  (табл. 2), то есть  $W_{\text{з.нар}} \ll W_{\text{з.вн}}$ , это означает, что запасенная энергия полей ДР в значительной мере сосредоточена внутри ДР и лишь малая ее часть снаружи.

### Список литературы

1. Бунин А.В., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Михалин С.Н. Диплексер С-диапазона на диэлектрических резонаторах. Базовая модель. Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2010. Вып. 3 (506).
2. Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Шутов А.В. Способ измерения добротности миниатюрных открытых диэлектрических резонаторов на сверхвысоких частотах // Измерительная техника. 2021. № 6.
3. Геворкян В.М., Вишняков С.В., Казанцев Ю.А., Шутов А.В. Добротность диэлектрического резонатора в экранированных линиях передачи СВЧ с потерями. Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования) / XXIX Международная конференция. М.: Издательство МЭИ, 2021.

# FORECASTING TECHNICAL STATE AND EFFICIENCY FUNCTIONING OF ELECTRIC SWITCHING DEVICES OF ELECTRICAL COMPLEXES

*Elena I. Gracheva<sup>1</sup>, Oleg V. Naumov<sup>2</sup>, Alexey N. Gorlov<sup>3</sup>*

*<sup>1,2</sup>Kazan, Kazan State Power Engineering University*

*<sup>3</sup>Kursk, Southwest State University*

During operation, the contact connections of low-voltage switching devices are subjected to mechanical and chemical stress, which leads to an increase in their transient resistance and, as a result, to overheating under the action of the load current and subsequently to destruction. The rate of development of defects depends on the design of the contact connection, its location and the intensity of external influences. The time interval between the occurrence of a defect and the emergency failure of the contact group ranges from several months to several years.

The main monitoring of contactors is the measurement of DC transient resistance. Contact resistance is measured with a microohmmeter type M-246. Using the ammeter-voltmeter method, resistance is measured indirectly. The method of a single bridge (Winston bridge) or a double bridge (Thompson bridge) is widely used [1].

Earlier in the power industry, electric thermometers, thermal candles, thermal films and thermal indicators were used to control contact connections and current-carrying parts. Currently, thermal imagers are successfully used for these purposes. It became possible not only to measure the temperature of individual points, but also to observe the thermal regimes of electrical installations.

The amount of heat generated at a defective contact depends on the square of the current flowing through it, the contact resistance and time.

The thermal energy released during the flow of current through the contact resistance is transferred in the form of thermal radiation to the environment, to the mating current-carrying parts and insulating devices. The temperature of contact joints depends on many factors, including the area of their surfaces, heat transfer coefficients of conjugated current-carrying parts, environmental parameters (temperature) [2].

In [3], as the main criterion for the serviceability of contact connections of switching devices, the limiting temperature of their heating (exceeding the heating temperature over the ambient temperature) at a nominal current  $I_{nom}$  was adopted, and in [4] – the limiting value of the resistance of the phase (pole) of the device and its parts. These two criteria for the serviceability of the switching device are equivalent, since the heating of the contact connections occurs to the temperatures indicated in [3] due to the flow of the load current  $I_{load} = I_{nom}$  and the release of energy in the resistance of the device, the source power of which is proportional to the resistance of the current-carrying system.

As a criterion for assessing the state of the contact groups of switching devices, the excess of the heated part of the contact over the ambient temperature is acceptable.

Based on the value of the load current  $I_{load}$  and the nominal current of the switching device  $I_{nom}$ , the calculated temperature rise is calculated:

$$t_{norm} = t_{nom} \left( \frac{I_1}{I_{nom}} \right)^2, \quad (1)$$

where  $t_{norm}$  – is the normalized value of the heating temperature excess for the controlled object (contact connection).

The calculated value of the resistance of the contacts of switching devices at a normal conversion temperature is calculated by the expression:

$$R_{norm} = R_m \frac{K + t_{norm}}{K + t_m}, \quad (2)$$

where  $R_m$  – is the measured resistance value at temperature  $t_m$ , Ohm;  $K$  – is the coefficient for copper, equal to 235;  $t_{norm}$  – is the nominal temperature equal to 40 °C [3];  $t_m$  – is the ambient temperature, °C.

The electrical resistance of the contacts is determined by the expression:

$$R = R_{norm} + \alpha t_{norm} k_{load}^2, \quad (3)$$

where  $\alpha$  – is the temperature coefficient depending on the material of the conductor;  $k_{load}$  – is the load factor of the switching device;  $R_{norm}$  – is the nominal resistance of the contact groups of the switching device [4].

Forecasting the development of a random process that reflects the functioning of any complex system should be preceded by statistical

processing of the experimental results in order to construct a correlation field. Using then the correlation field, one can find an empirical regression, that is, establish a quantitative relationship between the characteristics of the process. The next step is the approximation of the limiting empirical regression curve. The simplest form of fitting this curve would be linear regression:

$$\gamma = \alpha + \beta x. \quad (4)$$

Using the principle of least squares, it is easy to compose a normal linear regression equation [2]:

$$\begin{cases} \sum y_i - \sum (\alpha + \beta x_i) = 0; \\ \sum y_i x_i - \sum (\alpha + \beta x_i) x_i = 0; \end{cases} \begin{cases} \alpha m + \beta \sum x_i = \sum y_i; \\ \alpha \sum x_i + \beta \sum x_i^2 = \sum y_i x_i. \end{cases} \quad (5)$$

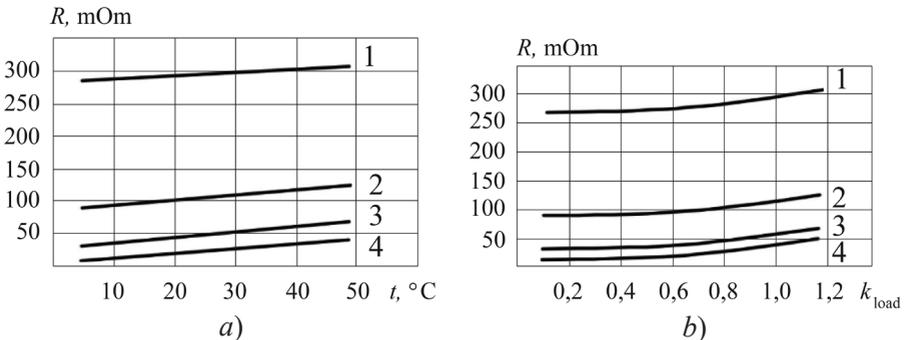
The value of  $\beta$  – is the regression coefficient,  $\alpha$  – is the free term of the regression:

$$\beta = \frac{m \sum y_i x_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad \alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{m}.$$

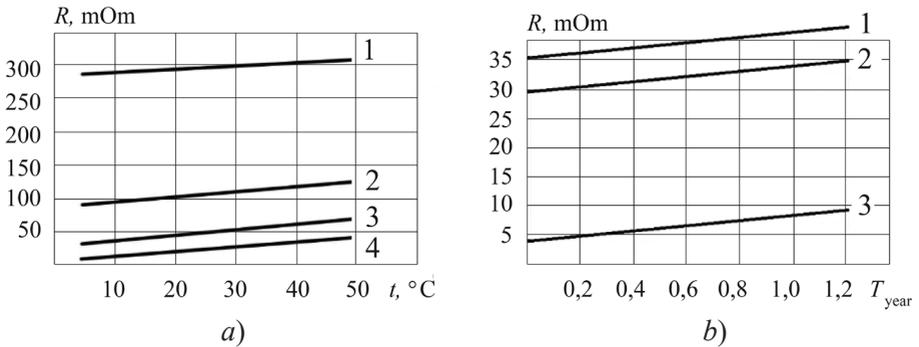
The resulting expressions completely determine the linear regression for a given sample.

Equality (5) for the free regression term can be rewritten as

$$\alpha = \frac{1}{m} \sum y_i - \beta \frac{1}{m} \sum x_i = \bar{y} - \beta \bar{x}, \text{ where } \bar{y} = \alpha + \beta \bar{x}.$$



**Fig. 1.** Dependence of the resistance of the contact connection of magnetic starters on the ambient temperature (a); resistance of the contact connection of magnetic starters from the load factor (b): 1 –  $R_{\text{nom}} = 275$  mOm; 2 – 82,5 mOm; 3 – 33 mOm; 4 – 13,1 mOm



**Fig. 2.** Dependence of the resistance of the contact connection of the circuit breaker on the ambient temperature (a); resistance of the contact connection of automatic switches from the service life (b): 1 –  $R_{\text{nom}} = 3774$  mOm; 2 – 2779 mOm; 3 – 17745 mOm

We obtain that the midpoint  $(\bar{x}, \bar{y})$  of the joint distribution of the studied quantities always lies on the regression line. To determine the regression line, it is sufficient to know only its slope  $\beta$ .

The fact that the dependence under study is assumed to be linear allows us to use the sample correlation coefficient  $r$  to estimate the strength of the connection:

$$r = \beta \sqrt{\frac{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}. \quad (6)$$

The operability of the switching device (diagnosis object) is determined by the resistance of its contacts  $R_c$ . The nature of the change in the  $R_c$  parameter can be described using the expression

$$R_c = R_{\text{nom}} - kT, \quad (7)$$

where  $k = \frac{(R_{\text{nom}} - R_p)}{T}$ ;  $T$  – is the operating time, years;  $R_p = 5R_{\text{nom}}$  – permissible contact resistance [5].

In the process of analytical prediction of changes in the resistance of contact groups of low-voltage switching devices (magnetic starters and circuit breakers) under various operating conditions, mathematical models are obtained, the input values of which are refined using regression analysis.

The change in the resistance of the contact connections of low-voltage devices is one of the characteristics of their technical condition and allows us to evaluate the efficiency of the functioning of the equipment in the housing and communal sector.

*The publication was financially supported by the state task of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation, project No. 0851-2020-0032 «Research of algorithms, models and methods for improving the efficiency of complex technical systems».*

### **References**

1. **Kalyavin V.P., Rybakov L.M.** Reliability and diagnostics of electrical installations: a tutorial. Yoshkar-Ola: Mar. state. un-t, 2000.

2. **Gracheva E.I.** Predicting the change in the resistance of contact connections of low-voltage switching devices by various methods // News of higher educational institutions. Energyproblems. 2008. № 7/8.

3. **GOST 2933-83.** Apparatuses electric low-voltage. Test methods. M.: Izd. standartov, 2002.

4. **Volumes and standards for testing electrical equipment.** M.: Energy, 2002.

5. **Shevchenko V.V., Gracheva E.I.** Determination of the resistance of contact connections of low-voltage switching devices // Industrial Energy. 2002. № 2.

# РАЗРАБОТКА СУПЕРКОНДЕНСАТОРА С УВЕЛИЧЕННЫМ РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ И РАСШИРЕННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ИНТЕРВАЛОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИЛОВЫХ УСТАНОВКАХ ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

*Кочетов И.И.<sup>1</sup>, Маслоченко И.А.<sup>1</sup>, Трухина О.Д.<sup>2</sup>, Стаханова С.В.<sup>2</sup>,  
Гуполов М.К.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Москва, НИТУ МИСиС, <sup>2</sup>Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева*

Актуальность вопросов, связанных с экологической безопасностью городской среды, в последнее время возросла и становится вопросом не только комфорта, но и здоровья его жителей. Плохое качество воздуха – одна из главных причин преждевременных городских и сельских смертей в 58 % случаев, а также фактор, способствующий аутоиммунным заболеваниям (12 % случаев), ишемических болезней (14 %) [1] и т.д. С этой точки зрения личный и муниципальный электрический транспорт – отличное решение, но активное внедрение тормозится проблемами, связанными с несовершенством электротранспорта. Для муниципального транспорта абсолютно нередки случаи, когда падает напряжение в сети, или линия обрывается, что усугубляется суровым климатом в нашей стране. Большинство из этих проблем решает использование суперконденсатора (СК), или электрохимического конденсатора, и это утверждение подтверждено практикой. Запас энергии СК позволяет проехать троллейбусу до 500 метров, чтобы восстановить контакт на работающем участке, при этом СК нестрашны морозы (может работать при очень низких температурах до – 55, чем не справляется ни один аккумулятор), а в московских электробусах суперконденсатор стал частью системы быстрой зарядки (5 – 8 мин на полный заряд) [2]. Для личного электротранспорта главной проблемой является литий-ионный аккумулятор, а точнее дефицит лития, с которым столкнулось их производство. Внедрение СК позволяет уменьшить объём источника мощности [3], что значительно позволяет удешевить электротранспорт, ведь до 20 % стоимости электромобиля составляет именно аккумулятор [4], а также продлить жизнь самого аккумулятора.

СК – это электрохимическое устройство, способное накапливать заряд. Конструкция СК представляет собой систему, состоящую из двух параллельно расположенных электродов, сделанных, как правило, из материалов с высокой удельной поверхностью, которые разделены между собой сепаратором и погружены в раствор электролита. Принцип работы СК основан на образовании двойного электрического слоя – слоя ионов (катионов и анионов), образующийся на поверхности границы раздела электрод – электролит, в результате адсорбции ионов из раствора электролита при подаче на электроды разности потенциалов. На поверхности электродов СК с двойным электрическим слоем почти полностью отсутствуют фарадеевские процессы, то есть нет электрохимических реакций с массобменом. Данный факт позволяет на несколько порядков увеличить время эксплуатации СК, которое измеряется в количестве циклов заряда и разряда (до  $10^6$ ). Приставка «супер» в названии данного устройства указывает на то, что в отличие от обычных конденсаторов СК накапливают значительно больше энергии и имеют на несколько порядков более высокую ёмкость. В первую очередь это связано с использованием в качестве электродов высокопористых материалов с большой удельной поверхностью, а также с расстоянием между ними. Расстоянием между электродами в СК является толщиной двойного электрического слоя (граница раздела электрод – электролит). На рис. 1 представлена схема устройства СК.

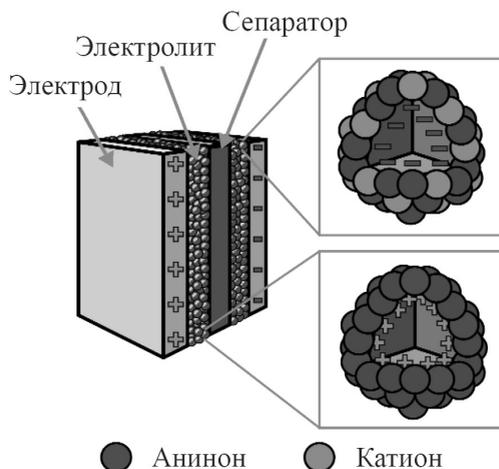


Рис. 1. Устройство суперконденсатора

СК являются импульсным электрохимическим источником энергии, поскольку они могут за значительно малый временной промежуток могут отдать всю ту энергию, которую они накопили. По этой причине их активно применяют в электрических приборах, которые потребляют большое количество энергии за короткое время. Примером таких устройств могут быть различная электронная аппаратура, вспышки профессиональных фотоаппаратов, автомобильные стартеры. СК используют для запуска военной техники в суровых климатических условиях, так как некоторые их виды сохраняют свои свойства на широком температурном интервале, включая отрицательные температуры. СК внедряют в электросети различных объектов для снижения пиковых нагрузок, приходящихся на них. Помимо всего прочего СК используются в гибридном транспорте, в электрокарах, а также, на сегодняшний день активно ведутся работы по изготовлению и изучению гибридных систем аккумуляторов и СК.

Изготовление СК, в основном, заключается в разработке его важнейших составляющих:

- 1) в подборе подходящих электродных материалов;
- 2) в поиске оптимальных электролитов.

Именно электролиты определяют основные электрохимические параметры СК. Электролит – вещество, проводящее электрический ток вследствие его диссоциации на ионы. К электролитам СК предъявляются следующие условия:

- широкое электрохимическое окно;
- высокая электропроводность;
- широкий температурный интервал эксплуатации;
- огнестойкость;
- малая вязкость.

Мощность и энергия СК прямо пропорциональны квадрату напряжения, приложенного к электродам. В свою очередь, приложенное напряжение зависит от электрохимической стабильности электролита, которая определяется как диапазон максимально допустимых значений напряжения, при которых электролит не теряет своих свойств и не разлагается.

Основными типами электролитов являются водные (растворы различных солей, кислот или щелочей) и органические. Применение водных электролитов позволяет получить хорошую ионную проводи-

мость, что является достоинством, также они достаточно дешевы, но из-за малого окна электрохимической стабильности воды, равного 1,23 В, они проигрывают органическим электролитам, которые выдерживают рабочее напряжение до 2,7 В и более.

Электролиты для СК состоят из двух основных компонентов: растворителя и соли-ионогена, являющейся источником катионов и анионов, роль которых заключается в переносе заряда и формировании двойного электрического слоя. Для придания СК требуемых свойств в электролиты добавляют соразтворители или другие компоненты.

В рамках представленной работы был разработан органический электролит для СК, который способен стабильно функционировать при температурах от минус 65 до плюс 70 °С, а также при напряжении 3,25 В.

В качестве растворителя для электролита использовался ацетонитрил, который обеспечивает наиболее высокую электропроводность и является растворителем в большинстве коммерческих электролитов.

Расширение температурного диапазона работы электролита и, соответственно, СК, достигается за счет использования особого соразтворителя из класса простых эфиров. Этот соразтворитель обладает широким интервалом существования жидкой фазы (температура кристаллизации равна – 138 °С, температура кипения + 106 °С). Кроме того, соразтворитель обладает относительно низкой вязкостью (0,55 мПа·с), в связи с чем будут сохраняться высокие электрохимические свойства электролита и СК на его основе. Одним из главных преимуществ соразтворителя является отсутствие вторичных атомов углерода в альфа-положении по отношению к атому кислорода, что существенно повышает его электрохимическую стабильность.

Помимо соразтворителя, разработанный электролит имеет в своем составе особый ионоген (соль), а именно – 1,1-диметилпирролидиния тетрафторборат (DMP), который обладает катионом и анионом очень малого размера (порядка 0,3 нанометров). Такой размер иона позволяет СК накапливать большой заряд, что, в свою очередь, улучшает его ёмкостные и мощностные характеристики. Кроме того, отличительной особенностью используемого ионогена является циклическая структура катиона, обеспечивающая повышенную электрохимическую стабильность.

Использование в составе электролита компонентов, обладающих повышенной электрохимической стабильностью, а также способ его приготовления, позволил расширить рабочее напряжение СК до 3,25 В

с сохранением высокой ресурсной стабильности.

Такой СК в связке с аккумулятором гибридного транспорта позволит значительно увеличить его производительность. Во-первых, СК продлевает срок службы аккумулятора за счет сглаживания приходящей на него нагрузки. Во-вторых, увеличится температурный диапазон функционирования всей системы за счет широкого температурного диапазона самого СК. В-третьих, увеличение рабочего напряжения СК позволит получать большую мощность и энергию при сохранении размеров самого устройства. В-четвертых, появится возможность для рекуперации энергии торможения во время движения, особенно в городском цикле.

Таким образом, предложена модификация устройства, внедрение и развитие которого неразрывно связано с будущим электротранспорта в целом. Описанный электролит для СК позволяет при постоянстве таких важных характеристик, как электрохимическая стабильность, размер ячейки и стоимость производства, дать прирост мощности на 17 процентов. Использование разработанного электролита снимает ряд ограничений в применении и открывает новые возможности для внедрения СК в области электротранспорта, что, возможно, и станет именно тем шагом, который предоставит перспективу для покрытия растущего спроса на экологически чистую среду в городах.

### **Список литературы**

1. <https://www.who.int/ru/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health>
2. <https://www.elec.ru/publications/elektrotransport/6694/>
3. <https://rg.ru/2016/05/17/reg-pfo/nazvany-problemy-meshaiushchie-razvitiu-elektrotransporta-v-rossii.html>
4. <https://www.autonews.ru/news/58259c8a9a7947474311edd9>

# СОЗДАНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ

*Крючков И.А, Соковишин А.В., Юрков Д.И., Эргашев Д.Э.,  
Герасимчук О.А., Невский Р.Е., Ткачёв О.В., Чернов М.Ю.*

*Москва, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики им. Н.Л. Духова»*

Применение систем обнаружения радиоактивного ксенона является неотъемлемой частью глобальной системы верификации режима Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) [1].

Одним из примеров оборудования, используемого для сбора и анализа радиоактивного ксенона, является автоматическое устройство для сбора благородных газов SAUNA (Swedish Automatic Unit for Noble gas Acquisition). Описание прототипа устройства SAUNA, разработанного Шведским агентством оборонных исследований (FOI), приведено в [2]. Основной недостаток схемы детектора заключается в том, что во время измерения часть ксеноновой пробы сорбируется в материал пластмассового сцинтиллятора и остается в ячейке даже после ее вакуумирования и очистки путем откачки и промывки гелием [3]. Было установлено, что после удаления пробы в камере остается до 15 % остаточной активности пробы, называемой «эффектом памяти». Она приводит к повышению фона при последующих измерениях и увеличению минимально детектируемой концентрации. Одним из способов для устранения или уменьшения этого эффекта, является защита внутренней поверхности пластмассового сцинтиллятора покрытием, способным остановить диффузию ксенона в полимерный материал. В [4] рассмотрены два материала покрытия –  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ . Эффект памяти с применением этих покрытий измерялся для различных толщин покрытия путем облучения образцов пластмассового сцинтиллятора с покрытием радиоактивным ксеноном и без него.

ФГУП «ВНИИА» является разработчиком комплекса мониторинга МИКС. Конфигурация бета-детектирующей ячейки этого комплекса схожа с системами SAUNA, ARSA и выполнена из PVT (поливинилтолуол) типа BC-408 производства Saint-Gobain (США).

В качестве защитного покрытия внутренней поверхности пластмассового сцинтиллятора комплекса МИКС применен поли-хлор-пара-ксилилен (Парилен С).

В статье представлены сравнительные исследования рассматриваемых в [4] покрытий –  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  и покрытия из поли-хлор-пара-ксилилена, применяемого в детекторе комплекса МИКС. Описание и результаты сравнительных исследований составляют настоящую статью.

### *Материалы покрытий и методы нанесения*

Используемые методы описаны в [4]: атомно-слоевое осаждение ALD (Atomic Layer Depositon) для пленок  $Al_2O_3$ , плазмохимическое осаждение из газовой фазы PECVD (Plasma Enhanced Chemical VaporDeposition) для пленок  $SiO_2$  и метод пиролитической полимеризации хлор-пара-ксилилена.

Покрытия из поли-пара-ксилилена однородны по толщине и обладают высокими газобарьерными характеристиками [5]. Наименьшей газопроницаемостью обладают покрытия из поли-хлор-пара-ксилилена, подробно исследованные в [6].

В настоящей работе защитное покрытие формировалось с применением установки осаждения парилена Labcoter 2 PDS 2010. На внутреннюю поверхность сцинтилляционной камеры бета-детектора наносилось покрытие поли-хлор-пара-ксилилена. Толщина покрытия варьировалась временем пиролиза исходного димера. Режимы нанесения покрытия представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

Тип	Материал	Время осаждения, мин	Толщина, мкм
1	Парилен С	20	1 – 2
2	Парилен С	80	4 – 5
3	Парилен С	140	7 – 8

Описание режимов осаждения покрытий из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  [4] представлены в табл. 2.

Таблица 2

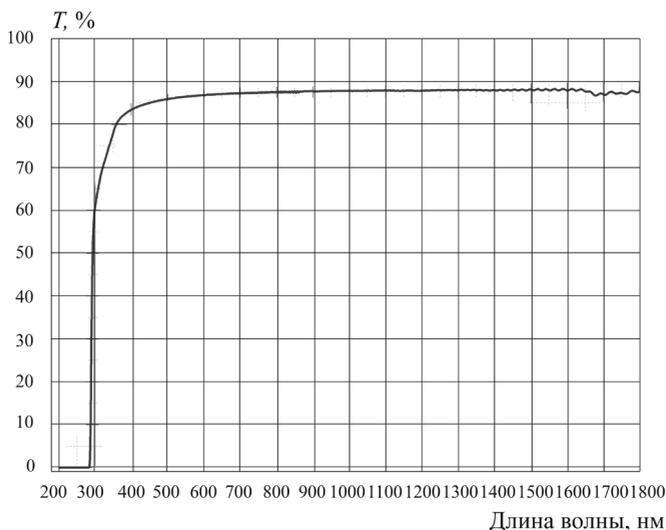
Тип	Материал	Толщина, нм	Температура, °C
1	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$20 \pm 4$	45
2	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$27 \pm 4$	65
3	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$72 \pm 7$	65
4	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$210 \pm 10$	45
5	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$425 \pm 10$	45
6	$\text{SiO}_2$	$230 \pm 46$	60
7	$\text{SiO}_2$	$422 \pm 84$	60
8	$\text{SiO}_2$	$901 \pm 180$	60

### *Измерение параметров покрытий*

Толщина покрытия из поли-хлор-пара-ксилилена определялась с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа LEXT. Свойства представленных в табл. 2 покрытий 1 – 3 типов определялись с помощью комбинации методов рентгеновской рефлектометрии и рентгено-флуоресцентного анализа [4]. Образцы 4 и 5 исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) на эталонных кремниевых подложках. Образцы  $\text{SiO}_2$  анализировались путем экранирования части эталонного образца во время осаждения и последующего измерения высоты образуемого выступа с помощью профилометрии [7].

С помощью прецизионного сканирующего спектрофотометра Lambda 1050WB было проведено исследование спектра оптического пропускания покрытия поли-хлор-пара-ксилилена. Как следует из рис. 1, пропускание покрытия составляет более 85 % в диапазоне длин волн левее значения 425 нм, соответствующего максимуму эмиссии сцинтиллятора BC-408.

Материалы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  также прозрачны для света сцинтиллятора, так как их запрещенная энергетическая зона значительно превышает 3 эВ – энергию, соответствующую длине волны 400 нм.



**Рис. 1.** Спектр оптического пропускания покрытия поли-хлор-пара-ксилилена

Для количественной оценки эффекта памяти, перечисленных в табл. 2 образцов, были проведены эксперименты в соответствии с методикой [4].

Для количественной оценки эффекта памяти образцов из поли-хлор-пара-ксилилена измерения проводились с использованием методики ФГУП «ВНИИА».

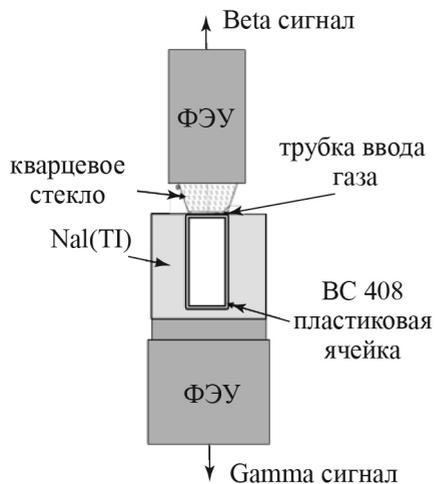
Исследование эффекта памяти проводилось с помощью детекторов, которые были изготовлены ФГУП «ВНИИА» для комплекса мониторинга радиоактивных изотопов ксенона – МИКС.

На рис. 2 показана упрощенная схема детектора МИКС, а на рис.3 – фотография детектора без свинцовой защиты.

На рис. 4 приведены результаты экспериментов, полученных в [4] по определению эффекта памяти исследуемых образцов.

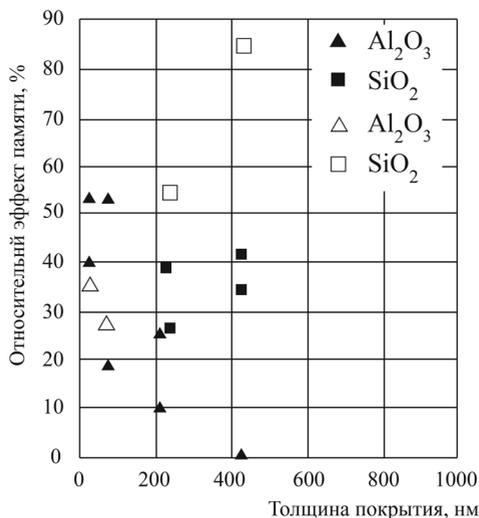
Эффект памяти изготовленных во ФГУП «ВНИИА» детекторов измерялся для различных пластиковых сцинтилляционных ячеек с защитным покрытием разной толщины и без защитного покрытия. От образца к образцу отмечались флуктуации; усреднённые результаты измерений приведены на рис. 5.

Наблюдение в течение двух лет за результатами работы детекторов с защитным покрытием на комплексе МИКС подтверждает улучшение

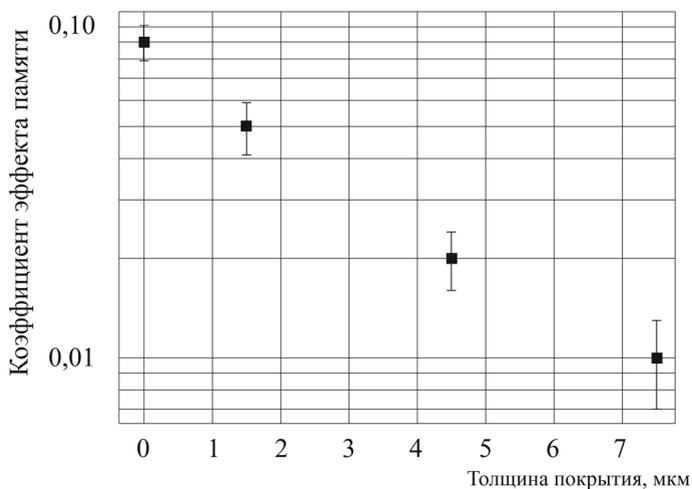


**Рис. 2** Упрощенная схема детектора бета-гамма совпадений МИКС

**Рис. 3** Детектор бета-гамма совпадений без свинцовой защиты



**Рис. 4.** Результаты измерений абсолютного и относительного эффекта памяти. Результаты абсолютных измерений приведены к результатам относительных измерений с помощью результатов, полученных для образцов без покрытия. Сплошные маркеры соответствуют абсолютным измерениям, незакрашенные – относительным



**Рис. 5.** Результаты измерений эффекта памяти в зависимости от толщины защитного покрытия поли-хлор-пара-ксилилена

характеристик по минимально детектируемой активности (МДА). Так средняя МДА по  $^{133}\text{Xe}$  составила около 5 мБк, что на 20 – 30 % меньше по сравнению с МДА в период использования детекторов без защитного покрытия.

При получении покрытий методами атомно-слоевого осаждения ALD (Atomic Layer Depositon) для пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и плазмохимического осаждения из газовой фазы PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) для пленок  $\text{SiO}_2$  происходит изменение свойств приповерхностных слоев пластикового сцинтиллятора с образованием новых микро и макросвойств. Качественное отличие образующихся приповерхностных слоев от остальной части сцинтиллятора заключается в появлении разрывов в макромолекулах, которые приводят к ослаблению межмолекулярных связей и, как следствие, к изменению физико-механических параметров этого слоя. Между нарушенным приповерхностным слоем и остальной частью образца возникает некоторое напряженное состояние, приводящее к молекулярной ориентации аморфной части полимера. Нагрузка на связи в полимере за счет напряжения распределяется неравномерно, что приводит к разрыву сплошности и образованию трещин, в результате чего происходит эрозия поверхности сцинтиллятора, образование пористости и, как следствие, деградация

нанесенного покрытия с нарушением адгезионных характеристик. От адгезии зависят и другие свойства изделия, например, такие как теплоёмкость, прочность, барьерные характеристики и сохраняемость эксплуатационных характеристик в процессе длительной эксплуатации в широком температурном диапазоне. Для надежного практического применения покрытий, полученных методами ALD и PECVD прочность сцепления разнородных материалов (пластмасса-покрытие) должна составлять не менее 1,5 кН/м на отслаивание или около 14 МПа на отрыв. Следует отметить, что наиболее выражено происходит ухудшение характеристик образцов сцинтиллятора ВС-444, прошедших процедуру фрезерования и накопивших значительное количество внутренних напряжений на поверхности полимерной основы. Образцы ВС-404 не демонстрируют такого же поведения, поскольку они были изготовлены другим способом.

Температурные коэффициенты термического расширения неорганических покрытий из аморфных  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  находятся в диапазоне  $0,3 - 8 \times 10^{-6} K^{-1}$ , что отличается от температурного коэффициента термического расширения полимерной основы из поливинилтолуола (PVT)  $70 - 80 \times 10^{-6} K^{-1}$  практически на два порядка, и также является возможной причиной нестабильности адгезионных характеристик этих покрытий в течение длительного времени.

Одним из методов согласования температурных коэффициентов термического расширения и нивелирования эффекта переходного слоя является применение полимерного защитного покрытия. Температурные коэффициенты термического расширения примененного во ФГУП «ВНИИА» полимерного покрытия из поли-хлор-пара-ксилилена  $35 - 45 \times 10^{-6} K^{-1}$  и полимерной основы из поливинилтолуола (PVT)  $70 - 80 \times 10^{-6} K^{-1}$  в достаточной мере согласуются, что существенным образом улучшает стабильность адгезионных характеристик покрытия в широком температурном диапазоне хранения и эксплуатации в отличие от неорганических покрытий из  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ .

Примененное во ФГУП «ВНИИА» покрытие из поли-хлор-пара-ксилилена толщиной 4 – 5 мкм позволяет достичь стабильного уровня эффекта памяти пластикового сцинтиллятора ВС-408 на уровне 1 – 3 %. Покрытие сцинтиллятора толщиной 1 – 2 мкм обеспечивает снижение эффекта памяти до уровня примерно 5 %, что является предельным зна-

чением для уровня сертификации систем детектирования. Применение покрытия толщиной 7 – 8 мкм приводит к снижению эффекта памяти пластикового сцинтиллятора до уровня 1 %, но также и к снижению разрешения и эффективности детектора и считается избыточным.

Покрытие из  $Al_2O_3$  толщиной 425 нм, нанесенное с помощью метода ALD, демонстрирует удовлетворительные свойства с точки зрения барьерных свойств. Однако с учетом основных факторов соответствия материала, обладающего достаточно большой долговечностью (порядка нескольких лет) при колебании температуры окружающей среды в диапазоне от  $-60$  до  $+60$  °С, небольшой разницы коэффициентов термического расширения (в пределах одного порядка), достаточно прочной связи между покрытием и основой (порядка нескольких кН/м), наличия достаточно устойчивого промежуточного слоя, отсутствия внутренних напряжений во всех составляющих системы покрытие-переходный слой-полимерная основа, с точки зрения практического применения в оборудовании для сбора и анализа радиоактивного ксенона большие перспективы демонстрируют покрытия из поли-хлор-пара-ксилилена, полученные методом пиролитической полимеризации.

#### Список литературы

1. <<http://www.ctbto.org/>>.
2. Ringbom A., Larsson T., Axelsson A., Elmgren K., Johansson C., *Nucl. Instr. And Meth.* 2003. A 508. 542.
3. Blackberg L., Ringbom A., Sjostrand H., Klintonberg M. // *Phys. Rev. B* 82 (2010) 195434.
4. Blackberg L. et al. Investigations of surface coating storeduce memory effect in plastic scintillator detectors used forradioxenon detection // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* A 656. 2011.
5. Ли Г., Стофи Д., Невилл К. Новые линейные полимеры. М.: Химия, 1972.
6. Кардаш И.Е., Пebaлк А.В., Праведников А.В. Химия и применение поли-п-ксилиленов. В кн.:Итоги науки и техники. Сер. Химия и технология высокомолекулярных соединений. Т.19. М.: ВИНТИ,1984.
7. Fay A. Mitigation of the Radioxenon Memory Effect in Beta-Gamma Detector Systems by Deposition of Thin Film Diffusion Barriers on Plastic Scintillator. Master'sThesis. University of Texas at Austin, 2010.

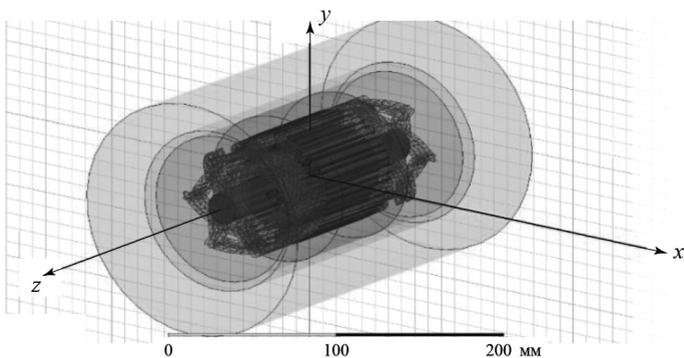
# ВЫЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДЕФЕКТОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПО НЕСИММЕТРИЯМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Казаков Ю.Б., Морозов А.Н., Морозов Н.А.*

*Иваново, ИГЭУ*

К синхронным генераторам (СГ) предъявляются высокие требования по надежности, так как их повреждения могут вызывать тяжелые последствия. Потери от каждого отключения крупного СГ в 2017 г. оценивались в среднем в 48 млн. руб. Более половины аварий СГ мощностью 160 – 300 МВт возникают вследствие электромагнитных повреждений обмоток якоря и возбуждения (обрывы проводников и параллельных ветвей, замыкания витков, нарушения контактов), магнитопровода (нарушение межлистовой изоляции магнитопроводов, выгорание листов стали) и т.п. Установка датчиков повреждений внутри СГ конструктивно не всегда возможна и/или требует согласований с производителями. В связи с этим перспективны внешние бесконтактные методы выявления внутренних электромагнитных повреждений СГ.

СГ при работе создают внешнее электромагнитное поле (ВЭМП), которое содержит в себе информацию о электромагнитных повреждениях СГ. Натурные эксперименты показывают возможность измерения ВЭМП на корпусе СГ с учетом его экранирования. Современные средства численного моделирования электромагнитных полей позволяют анализировать ВЭМП СГ с электромагнитными повреждениями. При симметричной нагрузке исправного СГ ВЭМП симметрично относительно осей  $d$  и  $q$ . Изменения из-за электромагнитных повреждений магнитных проводимостей и токов, возникающие электрическая и магнитная несимметрии будут вызывать искажение ВЭМП. Однако модели СГ для этих случаев развиты недостаточно, не исследованы несимметрии ВЭМП, не установлены взаимосвязи дефектов СГ с несимметрией ВЭМП, не выявлены диагностические признаки дефектов, нет методик определения вида и степени повреждений. Совершенствование методов бесконтактного выявления внутренних электромагнитных повреж-



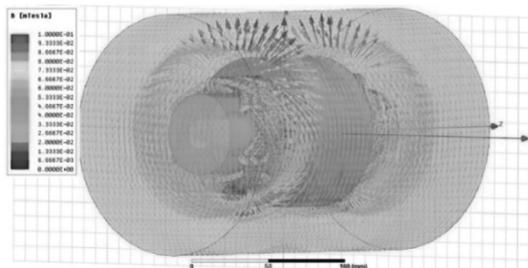
**Рис. 1.** Модель неявнополюсного СГ

дений СГ на основе анализа возникающих несимметрий ВЭМП представляет актуальную научно-техническую задачу.

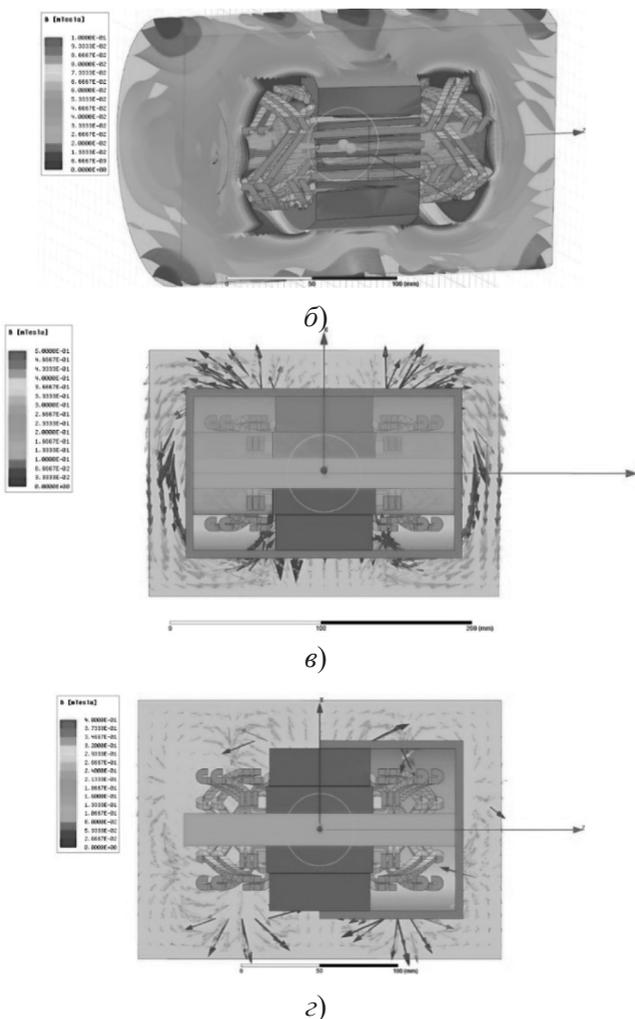
ВЭМП СГ моделировались в пакете Ansoft Maxwell. Установлено, что для выявления электромагнитных дефектов неявнополюсных СГ (НЯСГ) необходимо использовать 3D модели (рис. 1) и анализировать тангенциальную, радиальную и осевую составляющие индукции ВЭМП.

Был выполнен анализ ВЭМП лабораторного образца НЯСГ (рис. 2).

Выявлено, что в режиме номинальной  $R$ -нагрузки достаточно явно выражены осевые составляющие индукции ВЭМП, в режиме ХХ они выражены слабее. При нагрузке наиболее информативно контролировать индукцию ВЭМП в точках около торцов сердечника статора СГ, над лобовыми частями обмотки и на поверхности щита СГ ближе к валу машины. Так как повреждения ОВ в ВЭМП проявляются циклично с периодом, определяемым частотой вращения, то для контроля достаточно одного датчика ВЭМП. Целесообразно также устанавливать



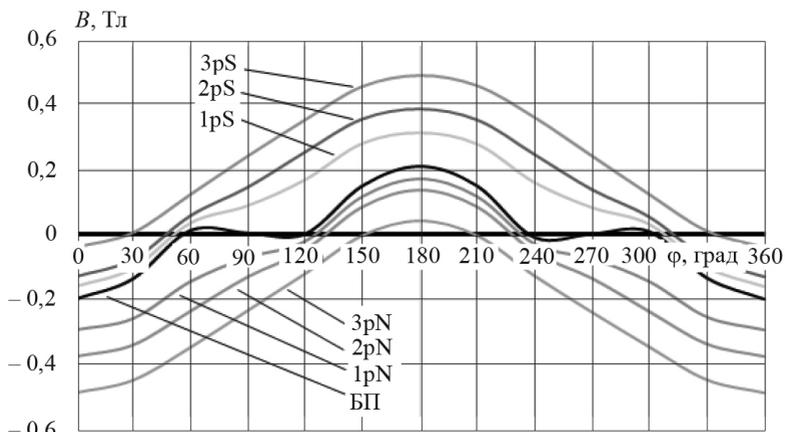
а)



**Рис. 2.** Результаты 3D моделирования ВЭМП НЯСГ: векторное поле индукции (а); цветовая гамма распределения индукции, режим ХХ (б); продольное сечение, режим ХХ (в); продольное сечение, режим нагрузки (г)

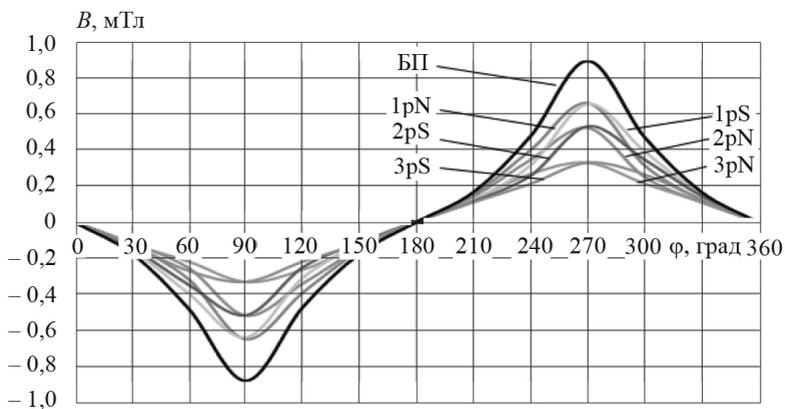
три датчика магнитного поля, ориентированных в разных плоскостях для фиксации составляющих индукции или один трёхкоординатный датчик.

В модели НЯСГ на каждом из двух полюсов размещены по три катушки ОВ: 1рN – катушка большого зуба; 2рN – средняя катушка; 3рN – экваториальная катушка полюса N. Для полюса S соответствен-



**Рис. 3.** Осевые составляющие индукции ВЭМП в зоне торцов сердечника

но: 1pS, 2pS и 3pS. Аббревиатурой БП (без повреждений) обозначено отсутствие повреждения катушек ОВ. На рис. 3 и 4 представлены графики изменения составляющих индукций ВЭМП в режиме XX. Из анализа графиков следует, что повреждение катушек N ведёт к смещению осевых составляющих индукций в зону отрицательных, относительно графика БП значений индукций; повреждение катушек S – к смещению этих составляющих в зону положительных индукций. При повреждениях катушек ОВ тангенциальные составляющие индукций ВЭМП не смещаются относительно оси, но изменяются по амплитуде от 26 до 63 %.

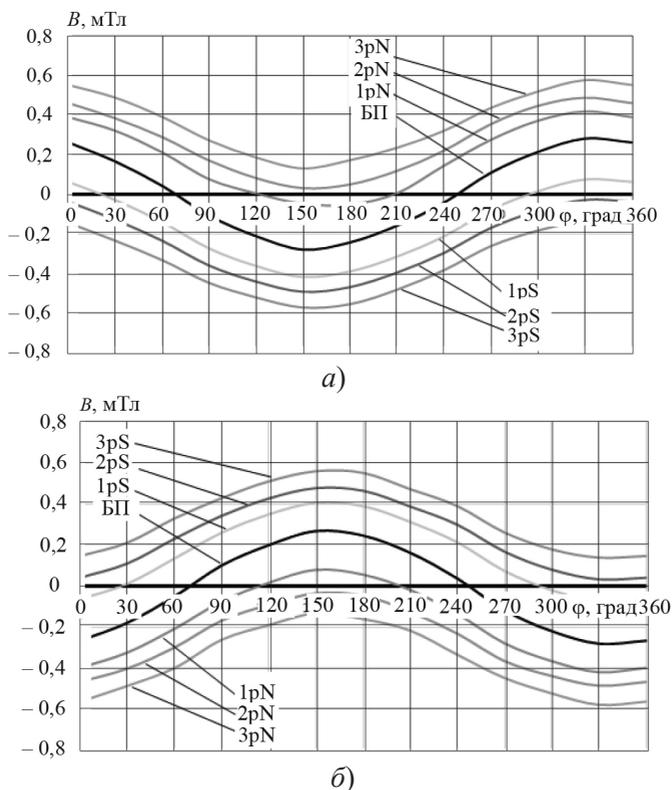


**Рис. 4.** Тангенциальные составляющие индукции ВЭМП в зоне торцов сердечника

При  $R$ -нагрузке осевые составляющие индукции более выражены на поверхности щита СГ ближе к валу (рис. 5). Зависимости находятся в противофазе, так как контроль проводился на противоположных торцах СГ.

При  $R-L$  нагрузке с  $\cos \varphi = 0,8$  и выше размагничивающее действие реактивной составляющей реакции якоря слабо влияет на индукцию ВЭМП, несколько уменьшая ее и изменяя фазу. Характер изменения составляющих индукции ВЭМП практически такой же, как при  $R$ -нагрузке. Близкий результат получен и при уменьшении нагрузки до 75 % номинальной.

В режиме ХХ тангенциальная составляющая индукции ВЭМП на поверхности сердечника в 2 – 4 раза больше радиальной и осевой со-



**Рис. 5.** Осевые составляющие индукции ВЭМП на поверхностях левого (а) и правого (б) щитов СГ при номинальной  $R$ -нагрузке при повреждениях катушек ОВ

ставляющих, что важно для контроля повреждений ОВ. При нагрузках  $R$  и  $R-L$  целесообразен контроль индукций в сечениях торцов сердечника статора и на поверхности щита ближе к валу, радиальной составляющей индукции в сечении над лобовыми частями обмотки.

Для определения повреждения ОВ НЯСГ может использоваться несимметричность распределения магнитной индукции – коэффициент несимметрии поля (КНП), как отношение средней индукции ВСР к пульсации индукции ВП (рис. 6). При отсутствии повреждений КНП = 0. КНП информативен для НЯСГ с  $2p = 2$ , у которых повреждение одной катушки ОВ вызывают не локальную несимметрию индукции, как у многополюсных СГ, а несимметрию распределения магнитного поля всего СГ. Знак КНП указывает полюс, в котором повреждена катушка ОВ. При изменении положения повреждённой катушки ОВ от большого зуба к экватору ротора смещение графика индукции сильнее.

Для автоматизации диагностики повреждения катушек ОВ разработаны алгоритм и программа гармонического анализа изменения индукций ВЭМП НЯСГ. Программа объединяет способы выявления повреждений катушек ОВ по анализу КНП и гармоническому анализу.

Максимальные индукции ВЭМП достигают 0,59 мТл, что позволяет их уверенно фиксировать. Экспериментально исследованы ВЭМП физической модели НЯСГ на основе двигателя АД 4ААМ63 с возможностью отключения катушек ОВ. Сигналы о радиальной, осевой и тангенциальной составляющих индукции ВЭМП с трёхкоординатного датчика обрабатывались ПК. На рис. 7 представлены изменения КНП при повреждениях катушек ОВ при ХХ.

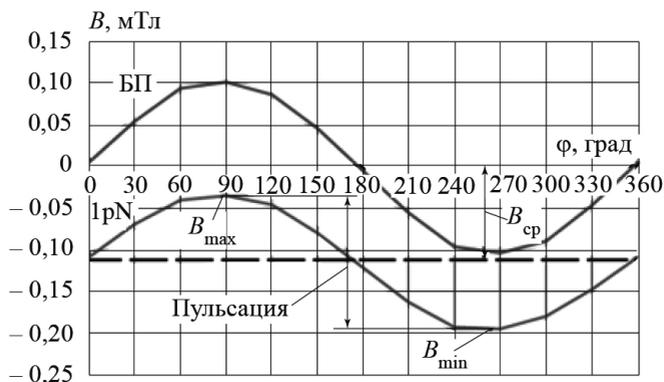
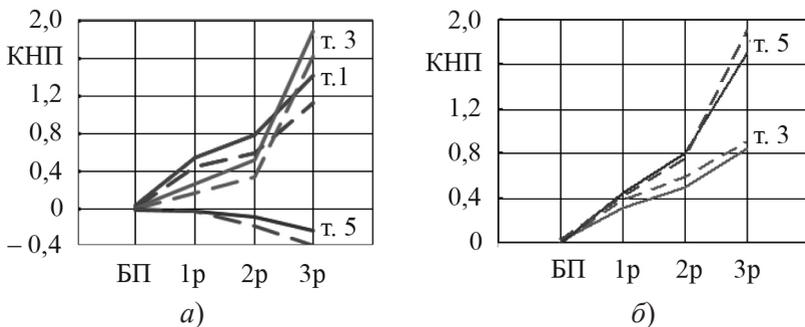


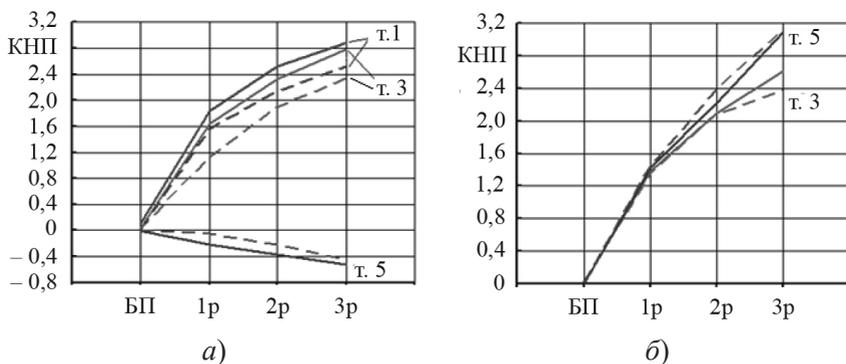
Рис. 6. Определение коэффициента несимметрии



**Рис. 7.** КНП при повреждениях катушек ОВ, режим ХХ: сплошные линии – расчёт; штриховые – эксперимент; радиальные (а) и осевые (б) составляющие индукции

Изменения КНП при повреждениях катушек ОВ в режиме нагрузки представлены на рис. 8. Выполненные эксперименты показали хорошую сходимость теоретических расчетов и результатов эксперимента. Рационален мониторинг ВЭМП по радиальной составляющей индукции на оси СГ, около торцов сердечника, над лобовыми частями ОЯ и на поверхности щита СГ ближе к валу, а осевой составляющей около торцов сердечника, над лобовыми частями ОЯ и на поверхности щита СГ ближе к валу.

Таким образом, предложен бесконтактный метод выявления внутренних электромагнитных дефектов синхронных генераторов на основе анализа возникающих несимметрий внешнего магнитного поля.



**Рис. 8.** КНП при повреждениях катушек ОВ, режим нагрузки: сплошные линии – расчёт; штриховые – эксперимент; радиальные (а) и осевые (б) составляющие индукции

## Список литературы

1. **Казаков Ю.Б., Морозов А.Н., Гуляев И.В.** Модельные несимметрии внешнего электромагнитного поля при повреждаемости синхронных генераторов // Электротехника. 2019. № 1.
2. **Морозов А.Н., Казаков Ю.Б.** Проблемы диагностики электромагнитных несимметрий электрических машин по внешнему магнитному полю / Тезисы докладов XXIII Междунар. конф. Студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т. 2. М.: МЭИ, 2017.
3. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021660043 «Программа для анализа внешнего магнитного поля синхронной машины»** / А.Н. Морозов, А.А. Семко, С.А. Нестеров / Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2021.
4. **Морозов А.Н.** Коэффициент несимметрии поля при повреждениях обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины / Междунар. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». Т. 3. Иваново, 2021.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

*Кручинин А.М., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Применение плазменно-дуговых печей (ПДП) в электрометаллургии является одним из перспективных направлений развития современных технологий плавки и обработки высоколегированных сталей и сплавов. Плавильный плазмотрон предназначен для формирования специальной теплообменной структуры в процессе нагрева электрической дугой в плавильном пространстве за счет стабилизации столба дуги струей плазмообразующего газа, формируемой соплом плазмотрона.

Нагрев дугой струи газа в плавильном пространстве печи создает дополнительный канал конвективного переноса тепла к обрабатываемому металлу, расширяя технологические возможности процессов рафинирования. Однако сложность многоступенчатого процесса теплообмена дуги с окружающей средой плавильного пространства существенно усложняет математическое описание и расчет электрических и тепловых

характеристик электрической дуги [1]. Вместе с тем, проектирование и совершенствование режимов работы промышленных ПДП требует разработки практических и легко реализуемых при проектировании методов расчета характеристик дуги как нелинейной электрической нагрузки и источника нагрева.

Современная теория нагрева электрической дугой [2] и результаты исследования влияния процессов теплообмена на характеристики дуги позволили установить универсальное свойство консервативности части столба дуги в удалении от катода, физический смысл которого заключается в том, что в любой длинной дуге атмосферного или близкого к атмосферному давлению при удалении от катода на расстояние от двух до трех радиусов дуги на поверхности столба образуется пространственный слой с повышенной объемной вязкостью. Реализующийся в этом слое механизм тепловой и гидродинамической диссипации турбулентных пульсаций при обтекании дуги турбулентным потоком газа препятствует проникновению турбулентности в плазму столба, что приводит к формированию стационарной двухслойной газодинамической структуры теплообмена дуги в виде ламинарного столба и внешней турбулентной среды [3]. В соответствии с положениями теории гидродинамической неустойчивости при такой устойчивой структуре перенос массы и тепла на поверхность столба дуги в процессе теплообмена дуги с внешней средой невозможен даже при наличии в газовой среде развитой турбулентности.

Это условие консервативности дуги атмосферного давления или, другими словами, отсутствия конвективного теплообмена в удаленной от катода части столба было теоретически и экспериментально подтверждено. Условие консервативности столба дуги послужило методологической основой для разработки математических методов теплообменной модели электрической дуги (ТОМЭД) [4], применяемой при проектировании технологических установок с нагревом электрической дугой атмосферного давления. Для решения практических задач проектирования ПДП можно с определенной степенью приближения применять известную модель теплообмена полуограниченной турбулентной струи газа при ее взаимодействии со стенкой [5].

Принимая для плазмотрона ПДП модель теплообмена плоской турбулентной струи, взаимодействующей с поверхностью цилиндрической части столба ТОМЭД, как с поверхностью квазитвердого тела, безраз-

мерный коэффициент теплоотдачи дуги ПДП можно записать в виде:

$$Nu = 0,178 Re^{\frac{13}{15}} \left( \frac{l_a}{b_0} \right)^{-\frac{2}{5}}, \quad (1)$$

где  $b_0 = (d_d - d_k)/2$  – ширина модели плоской струи плазмотрона;  $d_d$  – диаметр сопла плазмотрона;  $d_k$  – диаметр катода плазмотрона;  $l_a$  – длина дуги. Критерий Рейнольдса  $Re$  в (1) определяется следующим образом:

$$Re = \frac{V_0 b_0}{\nu} = \frac{V_0 b_0 \rho}{\eta}, \quad (2)$$

где  $V_0$  – скорость истечения струи в выходном сечении сопла плазмотрона;  $\eta$  – кинематическая вязкость струи;  $h$  – динамическая вязкость струи;  $\rho$  – плотность струи.

Подставляя в (1) выражения для скорости истечения струи в выходном сечении сопла плазмотрона

$$V_0 = \frac{4m}{\rho_0 \pi (d_d^2 - d_k^2)} \quad (3)$$

и критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{4mp}{\pi \rho_0 \eta (d_d + d_k)}, \quad (4)$$

приводим безразмерный коэффициент теплоотдачи дуги (1) к виду, связанному с параметрами плазмотрона ПДП:

$$\frac{ab_0}{\lambda} = 0,178 \left( \frac{\rho}{\eta \rho_0} \right)^n \frac{4^n \dot{m}^n}{\pi^n (d_d + d_k)^n} \left( \frac{l_a}{b_0} \right)^{-\frac{2}{5}}, \quad (5)$$

где  $n = 13/15$ ;  $\rho_0$  – плотность струи в выходном сечении сопла плазмотрона;  $m$  – поток массы плазмообразующего газа. В соответствии с (5) коэффициент теплоотдачи цилиндрической части столба:

$$\frac{d_a}{(T_{ua} - T_{st})} = \alpha = 0,78 \lambda \left( \frac{\rho}{\eta \rho_0} \right)^n \frac{\dot{m}^n}{b_0 (d_d + d_k)^n} \left( \frac{l_a}{b_0} \right)^{-\frac{2}{5}}, \quad (6)$$

где  $q_a$  – плотность теплового потока на поверхности столба, вызванного теплопроводностью плазмы;  $T_{sa}$  – температура на поверхности столба;  $T_{st}$  – средняя температура струи по длине дуги (для ПДП, работающей с аргоном,  $T_{st} = 1750$  К). С учетом (6) при условии  $(T_{sa} - T_s) = \text{const}$ , выражение для плотности теплового потока на поверхности цилиндрической части столба ТОМЭД ПДП, связанного с процессом теплопроводности плазмы и можно записать в виде:

$$q_{ac} = \sqrt{\tilde{\lambda} \left( \frac{\rho}{\eta \rho_0} \right)^n} \sqrt{l_a^{-\frac{2}{5}} b_0^{-\frac{3}{5}} \left( \frac{\dot{m}}{d_d + d_k} \right)^n}. \quad (7)$$

Вводя обозначение для первого (теплофизического) множителя и второго (газодинамического), можно записать условия подобия для расчета коэффициента теплоотдачи цилиндрической части столба ТОМЭД ПДП. Условие теплофизического подобия:

$$q_{ac} \sim K_{\lambda(\text{газ})}, \quad (8)$$

где

$$K_{\lambda} = \sqrt{\tilde{\lambda}(1750 \text{ К})} \left[ \frac{\rho(1750 \text{ К})}{\eta(1750 \text{ К}) \rho_0(700 \text{ К})} \right]^n, \quad (9)$$

условие газодинамического подобия

$$q_{ac} \sim K_{m(\text{газ})}, \quad (10)$$

где

$$K_m = \sqrt{l_a^{-\frac{2}{5}} b_0^{-\frac{3}{5}} \left( \frac{\dot{m}}{d_d + d_k} \right)^n}. \quad (11)$$

В плазменно-дуговых печах напряженность электрического поля столба и, как следствие, коэффициент теплоотдачи дуги слабо зависят от длины дуги [1], поэтому ее влиянием на коэффициент теплоотдачи цилиндрической части столба в ТОМЭД ПДП можно пренебречь, тогда (11) примет вид:

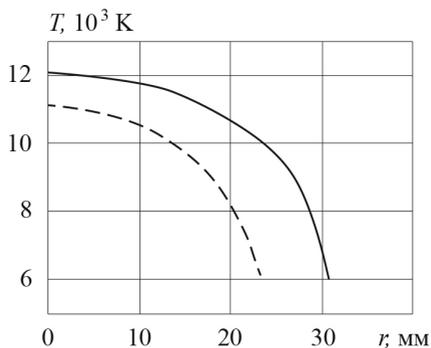
$$K_m = \sqrt{b_0^{-\frac{3}{5}} \left( \frac{\dot{m}}{d_d + d_k} \right)^n}. \quad (12)$$

Условия подобия коэффициента теплоотдачи цилиндрической части столба в ТОМЭД ПДП дают возможность рассчитывать электрические и тепловые характеристики дуги плазменно-дуговой печи с плавильным плазмотроном заданной мощности при работе с плазмо-образующим газом произвольного химического состава. Расчеты можно выполнять методом универсальных характеристик дуги на основе известных двух-факторных вольтамперных характеристик вида  $U_a = (I, I_a)$ , полученных экспериментально для некоторого базового плазмотрона ПДП, например, при работе с аргоном в начальный период плавки шихты при прожиге колодца. Например, известные экспериментальные вольтамперные характеристики [1, 2], полученные для плазмотрона ПДП емкостью 2 тонны (ПДП-2: рабочий ток 4500 А, диаметр катода  $d_k = 0,0254$  м, диаметр сопла  $d_d = 0,0381$  м, поток массы аргона  $m_i$  от 3,5 г/с), работающего с аргоном, в начале прожига колодца при плавке твердой шихты, позволяют определить значение напряженности электрического поля в консервативной (цилиндрической) части столба  $E_c = 388,5$  В/м. Метод универсальных характеристик дуги позволяет также рассчитать плотность теплового потока на поверхности столба, вызванного теплопроводностью плазмы, которая для выбранного в качестве базового плазмотрона составляет  $(q_{ac})_b = 0,263$  Вт/мм<sup>2</sup>.

В соответствии с условием теплофизического подобия (8), (9), плотность теплового потока на поверхности цилиндрической части столба ТОМЭД для того же плазмотрона, работающего на смеси аргона и водорода (90 % Ar + 10 % H<sub>2</sub>), при условии постоянства средней температуры струи составит:

$$q_{ac} = (q_{ac})_b \frac{(K_\lambda)_{\text{Ar}+\text{H}_2}}{(K_\lambda)_{\text{Ar}}} = 0,263 \frac{814}{500,13} = 0,336 \text{ Вт/мм}^2,$$

Рассчитанные методом универсальных характеристик ТОМЭД температурные профили удаленной от катода части столба дуги для плазмотрона ПДП-2 при работе на аргоме и газовой смеси (90 % Ar + 10 % H<sub>2</sub>) в начале прожига колодца после завалки шихты представлены на рис. 1. Температура печи, измеренная на внутренней поверхности футеровки, составляла 1300 К. На начальной стадии плавки шихты температура на оси столба дуги в отдалении от катода при одинаковом рабочем токе



**Рис. 1.** Температурные профили удаленной от катода части столба дуги плазмодугового ПДП-2

4500 А и работе с аргоном и газовой смесью отличалась незначительно, однако при увеличении интенсивности теплообмена дуги за счет добавки водорода в плазмообразующий газ происходит сжатие столба и увеличение мощности излучения дуги.

При длине дуги в начале прожига колодца 0,4 м мощность излучения при работе с аргоном составляет 360 кВт, а при работе на смеси аргона с водородом – 1700 кВт. При добавке водорода существенно возрастают тепловые нагрузки на футеровку свода печи, поэтому начальную фазу плавки (до окончания прожига колодца – когда длина дуги достигает максимального значения) следует проводить только в аргоне.

При добавке водорода возрастают напряженность электрического поля столба и напряжение дуги. Так, напряженность электрического поля столба в отдалении от катода в конце прожига колодца при температуре печи 1750 К и максимальной длине дуги ~1 м увеличивается с 297 (работа в аргоне) до 735 В/м (работа в смеси 90 % Ar + 10 % H<sub>2</sub>), при этом мощность излучения составляет 1300 и 3270 кВт соответственно.

### Список литературы

1. **Бортничук Н.И., Крутянский М.М.** Плазмодуговые плавильные печи. М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Krouchinin A.M., Sawicki A.** A theory of electrical arc heating. Czestochowa: Technical University of Czestochowa, 2003.
3. **Krouchinin A.M., Sawicki A.** A method of modelling heat transfer and

gasodynamic processes in arc plasmagenerators. High Temperature Material Processes // An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, 2003. Vol. 7. Iss.4.

4. **Кручинин А.М.** Физические основы теплообменной модели электрической дуги в электротехнологии / Сб. докладов «Электротехнология в первом десятилетии XXI века». М.: МЭИ, 2013.

5. **Юдаев Б.И., Михайлов М.С., Савин В.К.** Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977.

6. **Кручинин А.М., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю.** Расчет энергетических параметров плазменной печи с использованием цилиндрической модели дуги Меккера // Физика и химия обработки материалов. 2022. № 2.

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ПОДВЕСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРОКЛАДКИ

*Корякин А.Г., Холодный Д.С.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Современные конструкции подвесных оптических кабелей (ОК) и кабелей, проложенных в туннелях, включают жесткие или скользящие крепления для фиксации положения кабельных линий, представляющие подвижные и гибкие конструкции. Сейсмические волны или периодические ветровые воздействия на открытых пространствах приводят к значительным механическим нагрузкам, и могут привести к чрезмерным колебаниям кабельных изделий [1].

В работе выполнено аналитическое исследование устойчивости оптических кабелей, подверженных периодическим механическим колебаниям, с целью получить выражение в замкнутой форме, которое позволяет быстро оценить стабильность системы оптический кабель-крепление. Исследуется форма колебаний ОК для случая небольшого соотношения прогиба к пролёту. Натяжение оптического кабеля рассматривается в рамках модели струны при параметрическом возбуждении. Следует отметить, что необходимо избегать чрезмерных усилий механического

натяжения, которые могут привести к повреждению оптического кабеля, или очень малых встречных колебаний, которые могут привести к кратковременному провисанию тросов и их перехлесту. Таким образом, цель исследования состоит в оценке обоснованности использования натяжения и способов крепления для проектирования подвесных систем с оптическими кабелями с учетом безопасных условий эксплуатации. Частотный спектр вибрации кабеля сравнивается с диапазоном амплитуд и частот колебательного движений опор или креплений.

Правомерным является подход, при котором оптический кабель можно смоделировать как струну или трос, подвешенный между двумя точками, тем более что и сама конструкция ОК может содержать трос. Периодическая механическая нагрузка во время землетрясения вызывает колебания на концах кабеля. При рассмотрении такого процесса, как наложенное смещение хотя бы одного из граничных условий, позволяет получить дифференциальное уравнение движения в частных производных гиперболического типа с учетом изменения нагрузки в местах крепления оптического кабеля или троса. Если при сейсмическом воздействии волновая нагрузка возбуждает колебания по крайней мере на одном из концов кабеля, как циклическое гармоническое наложенное смещение граничного условия, то уравнение движения может быть получено с учетом установившегося динамического равновесия, используя принцип Д'Аламбера [2].

Предлагаемый спектральный подход может быть легко реализован в коде «Python» и гораздо менее требователен, чем полный нелинейный динамический анализ [3]. Этот подход может быть распространён и на другие приложения, включающие слабо нелинейные структуры – кабельные линии, подверженные землетрясениям и динамическим ветровым воздействиям.

### **Список литературы**

1. **S. Ali Ghafari Oskoei, Ghyslaine McClure.** A novel approach to evaluate the equivalent dynamic stiffness of guy clusters in telecommunication masts under ground excitation // *Engineering Structures*. 2011. Vol. 33.
2. **Маневич Л.И., Гендельман О.В.** Аналитически разрешимые модели механики твердого тела. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2016.
3. **Ланда П.С.** Нелинейные колебания и волны. М: ЛИБРОКОМ, 2019.

# РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Кручинин А.М., Кожеченко А.С., Погребиский М.Я.,  
Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока (ДСПТ) являются сложными и энергоемкими электротехническими объектами с ограниченными возможностями автоматического управления электрическим режимом в период плавления твердой шихты, несмотря на применение сложной и капиталоемкой управляемой системы электропитания (УСЭП) с управляемым выпрямителем и переключением ступеней напряжения печного трансформатора.

Сосредоточение мощности нагрева в одной дуге, расположенной по оси плавильной ванны, и высокая интенсивность плавления в режиме длинной дуги с преобладанием мощности излучения плазмы столба существенно сокращают длительность начального периода плавки до момента конца прожига колодца по сравнению с дуговыми сталеплавильными печами переменного тока (ДСП). Чрезвычайно короткая длительность начального периода плавки, значительное изменение длины и напряжения дуги делают невозможным поддержание устойчивого горения дуги даже за счет автоматического управления напряжением выпрямителя и, тем более, за счет перемещения электрода. В связи с этим именно начальный период плавки при заданной мощности печного трансформатора определяет выбор рабочего тока и максимального за плавку напряжения дуги.

Основной задачей на стадии разработки технического задания на рабочее проектирование ДСПТ является задание мощности печного трансформатора и диаметра кожуха в зависимости от вместимости печи. В соответствии с опытом разработки и эксплуатации дуговых печей как переменного, так и постоянного тока необходимо учитывать влияние на напряжение дуги температуры газовой среды в плавильном

пространстве (температуры печи) и температуры электрода, которая зависит от диаметра электрода, тока дуги и температуры печи. Этот установленный опытом фактор широко отмечался специалистами уже с конца 70-х годов прошлого столетия [1].

Таким образом, ввиду ограниченности управления электрическим режимом ДСППТ в период начала расплавления твердой шихты базовой точкой (критическим моментом) режима является момент конца прожига колодца, когда температура газовой среды в виде оксидов углерода в плавильном пространстве печи составляет  $T_p = 1320$  К [2]. Именно в этот момент плавки напряжение дуги достигает своего максимального значения, которое зависит от следующих факторов: температуры печи  $T_p$ , диаметра электрода  $D_{el}$ , рабочего тока дуги  $I_{rab}$ , диаметра кожуха печи  $D_{kog}$  :

$$U_{dm} = (U_d)_{\max} = f(T_p = 1320 \text{ К}, D_{el}, I_{rab}, D_{kog}). \quad (1)$$

На основе современных методов теории нагрева электрической дугой [3] и разработанного в МЭИ математического метода теплообменной модели электрической дуги (ТОМЭД) ДСППТ можно рассчитать для указанного критического момента плавки шихты значение средней напряженности электрического поля в плазме столба дуги [2] как многофакторной функции:

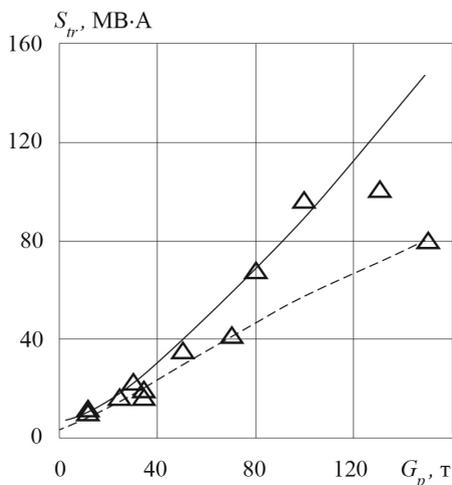
$$E_{sr} = f(T_p = 1320 \text{ К}, D_{el}, I_{rab}, D_{kog}) \quad (2)$$

и тем самым решить многофакторную задачу определения характеристик дуги в критический момент плавки шихты на основе значений мощности печного трансформатора и диаметра кожуха печи.

На основании обобщения данных последних публикаций на рис. 1 представлены границы значений максимальных и минимальных мощностей печей.

Аналитически указанную границу максимальных значений мощности трансформатора ДСППТ (в МВА) от вместимости печи  $G_p$  (в тоннах) можно представить выражением:

$$S_{tr} = \exp \left[ \frac{1,71477 + 0,08188 \cdot G_p}{1 + 0,012 \cdot G_p} \right], \text{ МВ} \cdot \text{А}. \quad (3)$$



**Рис. 1.** Мощности трансформаторов ДСППТ, действующих в мировой практике

Соответственно, границу минимальных значений мощности можно представить выражением:

$$(S_{tr})_{\min} = \exp \left[ \frac{1,71477 + 0,08188 \cdot G_p}{1 + 0,012 \cdot G_p} \right], \text{ MB} \cdot \text{A}. \quad (4)$$

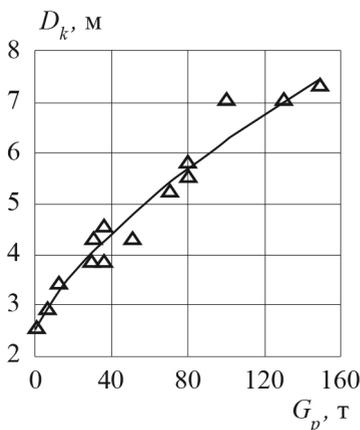
Верхняя граница характерна для печей, эксплуатируемых в Японии и Германии, нижняя граница – для печей США.

Диаметр кожуха действующих ДСППТ отличается меньшим разбросом (рис. 2) и его зависимость от вместимости печей можно представить обобщенной формулой:

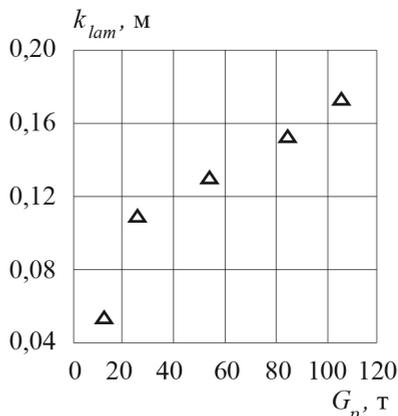
$$D_k(G_p) = 2,54675 + 0,08028 \cdot \sqrt{G_p} \cdot \ln(G_p), \text{ м}. \quad (5)$$

Кривая значений диаметра кожуха, рассчитанных согласно (5), представлена на рис. 2.

Задаваемые значения мощности трансформатора позволяют на основе методов расчета динамических систем с дугой [4] для обеспечения устойчивости дуги при питании от управляемого выпрямителя с автоматическим регулятором тока дуги принять минимально допустимое отношение максимального выпрямленного напряжения  $U_{d0}$  к макси-



**Рис. 3.** Расчетные значения показателя максимальной длины дуги



**Рис. 2.** Зависимость диаметра кожуха от вместимости ДСППТ

мальному напряжению дуги  $U_{dm}$  равным 1,2. В этом случае мощность выпрямителя при проектировании ДСППТ:

$$P_{d0} = \frac{S_{tr}}{(1,2)^2 \cdot I_{rab}}, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где  $S_{tr}$  – мощность трансформатора, кВА;  $I_{rab}$  – рабочий ток дуги, кА.

На рис. 3 приведены значения показателя максимальной длины дуги:

$$k_{lam} = k_{lam}(G_p) = \frac{(l_a)_{max}}{D_k(G_p)}. \quad (7)$$

Показатель максимальной длины дуги  $k_{lam}$  однозначно зависит от геометрии плавильной ванны, то есть от диаметра кожуха и, как следствие, только от емкости проектируемой печи. В связи с этим в расчетах характеристик дуги для критического режима, как следует из рис. 3, можно принять  $k_{lam} = 0,12$ , тогда значение максимальной длины дуги за все время плавки, достигаемое в момент критического режима, с учетом (5):

$$(l_a)_{max} = 0,12 \cdot \left[ 2,54675 + 0,08028 \cdot \sqrt{G_p} \cdot \ln(G_p) \right], \text{ м}. \quad (8)$$

С учетом (3), (4), (6), (7), (8) методом ТОМЭД ДСППТ [2] можно в цикле изменения рабочего тока дуги при температуре газовой среды

в виде оксидов углерода  $T_p = 1320$  К рассчитать все необходимые для проектирования характеристики дуги.

Рассчитанные зависимости этих характеристик для принимаемого максимального (3) и минимального (4) значений мощности трансформатора для удобства разработки технического задания можно представить в аналитическом виде. Для этого можно воспользоваться обычными компьютерными программами аппроксимации табличных данных, применяемыми в инженерной и научной практике.

В результате на стадии разработки технического задания можно пользоваться физически и математически обоснованными формулами, в отличие от существующих до настоящего времени противоречивых методов, слабо согласованных с мировым опытом разработки и эксплуатации ДСППТ.

При максимальном (3) уровне мощности печного трансформатора:  
– рабочий ток дуги ДСППТ при заданной вместимости:

$$I_{rab} = 11,495 + 0,82063 \cdot G_p \text{ [т]}, \text{ кА}; \quad (9)$$

– максимально напряжение дуги:

$$(U_a)_{\max} = U_{dm}(G_p) = \sqrt{124502 + 4946,7805 \cdot G_p}, \text{ В}. \quad (10)$$

При минимальном (4) уровне мощности печного трансформатора рабочий ток дуги ДСППТ при заданной вместимости:

$$I_{rab} = \exp \left[ \frac{2,0859 + 0,12631 \cdot G_p}{1 + 0,02543 \cdot G_p} \right], \text{ кА}. \quad (11)$$

Максимальное напряжение дуги:

$$(U_a)_{\max} = U_{dm}(G_p) = \left( 17,342 + 0,9976 \cdot \sqrt{G_p} \right)^2, \text{ В}. \quad (12)$$

Расчет по изложенному методу значений рабочего тока и максимального напряжения дуги сталеплавильных печей постоянного тока позволяет согласовано с мировым опытом разработки и эксплуатации ДСППТ рассчитать на стадии формирования технического задания на проектирование печей заданной вместимости геометрические размеры плавильной ванны, выбрать диаметр электрода и определить необходимые параметры управляемого выпрямителя установки.

## Список литературы

1. **Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я.** Электрические промышленные печи. Ч. 2. Дуговые печи. М.: Энергия, 1970.
2. **Кручинин А.М., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю.** Прогнозирование энергопотребления в период плавки шихты в дуговых сталеплавильных печах // Вестник МЭИ. 2019. № 6.
3. **Егоров А.В., Моржин А.Ф.** Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока. М.: Ин-т Черметинформация. 1992. Вып. 2.
4. **Кручинин А.М.** Расчет динамических систем с электрической дугой. М.: МЭИ, 1988.
5. **Ben Bowman, Klaus Kruger.** Arc Furnace Physics. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009.

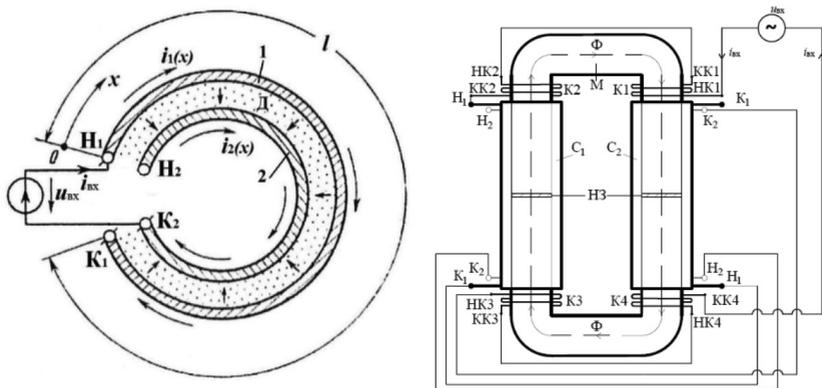
# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КАТКОНА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

*Кулешова Г.С., Михеев Д.В.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Актуальной задачей современных распределительных сетей и систем электроснабжения потребителей является обеспечение нормативных показателей качества электроэнергии и повышение электромагнитной совместимости. Комплексным решением этой проблемы является использование фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Перспективным направлением по улучшению массогабаритных и стоимостных показателей ФКУ является применение гибридных индуктивно-емкостных элементов (катконов), что позволяет улучшить технико-экономические показатели ФКУ примерно на 10 – 20 % [1 – 3].

Каткон является электротехническим элементом, конструкция которого образована двумя проводниками в виде фольги 1 и 2 длиной  $l$  и изолирующим их слоем диэлектрика  $D$  с заданными количеством вит-



**Рис. 1.** Секция каткона (один виток, вид сверху) (а), функциональная схема однофазного ФКУ на базе каткона (б) [6 – 7]

ков (рис. 1,а). К источнику напряжения  $u_{вх}$  каткон подключается через начало первого  $H_1$  и конец второго  $K_2$  проводника, а выводы проводников  $K_1$  и  $H_2$  остаются разомкнутыми. Таким образом представляется возможным реализовать в катконе принцип самокомпенсации реактивной мощности и объединить функции реактора и конденсатора в едином электротехническом объекте [1, 4 – 5].

Принцип работы ФКУ на базе каткона аналогичен принципу действия стандартного пассивного ФКУ [8]. При создании однофазных пассивных ФКУ на базе катконов эффективной является конфигурация устройства, состоящая из двух секций катконов ( $C_1$  и  $C_2$ ), дополненных катушками коррекции (КК), размещенными на двух П-образных участках магнитопровода (М), разделенных немагнитными зазорами (НЗ) (рис. 1,б). Наличие КК и НЗ с помощью средств автоматики позволяет эффективно управлять магнитными потоками и регулировать эквивалентные параметры ФКУ для достижения необходимых резонансных частот [9].

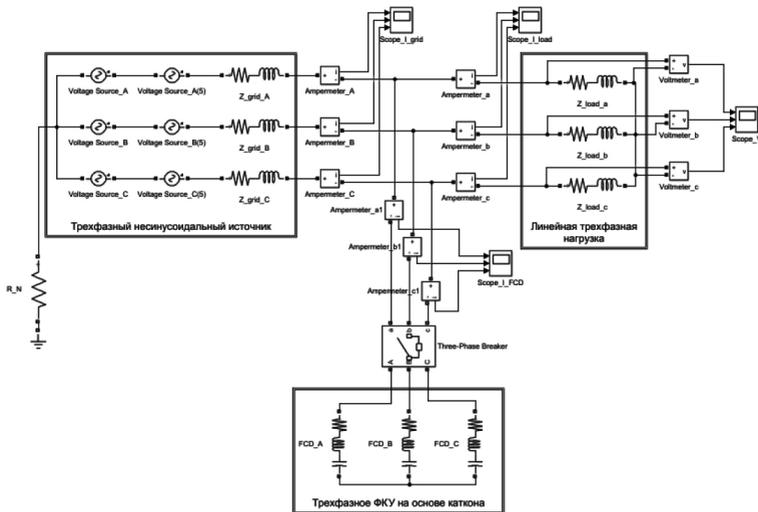
В работе рассматривается трехфазная фильтрокомпенсирующая система, образованная тремя однофазными ФКУ на базе каткона, не имеющими между собой магнитной связи.

В [10] исследованы переходные процессы, вызванные подключением трехфазного ФКУ на базе каткона к сети с изолированной нейтралью. Таким образом, в работе ставится задача компьютерного моделирования переходных процессов в трехфазной сети с изолированной

нейтралью при отключении ФКУ на базе каткона от сети для оценки возможности возникновения неблагоприятных режимов.

Компьютерное моделирование отключения трехфазного ФКУ на базе каткона от трехфазной сети с изолированной нейтралью осуществляется в MATLAB/Simulink (рис. 2). В основу компьютерной модели ФКУ на базе каткона (рис. 2, блок «Трехфазное ФКУ на основе каткона») положена математическая модель, созданная на основе упрощенной схемы замещения каткона с разомкнутыми выходными выводами  $K_1$  и  $H_2$  [4].

Электрическая сеть моделируется трехфазным несинусоидальным источником напряжения и комплексным сопротивлением  $Z_{grid} = 1 + j2\pi \cdot k \cdot f \cdot Z_{grid}$  Ом ( $Z_{grid} = 8,5$  мГн). Несинусоидальный источник напряжения представляется двумя источниками синусоидального напряжения в соответствии с разложением в ряд Фурье ( $U_m(1) = 8165$  В,  $U_m(5) = 1500$  В), а потребитель – трехфазной симметричной активно-индуктивной нагрузкой  $Z_{load} = 80 + j2\pi \cdot k \cdot f \cdot Z_{load}$  Ом, ( $Z_{load} = 0,5$  Гн,  $\cos\varphi = 0,45$ ). Для фильтрации пятой гармоники напряжения питаю-



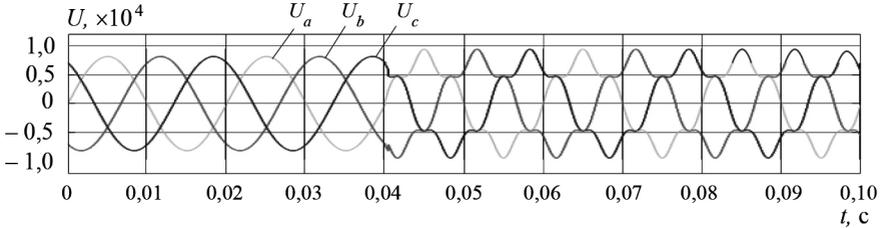
**Рис. 2.** Компьютерная модель в MATLAB/Simulink для исследования переходных процессов при подключении и отключении трехфазного ФКУ на основе каткона от электрической сети с изолированной нейтралью

щей сети ( $k = 5$ ) и компенсации реактивной мощности параллельно к нагрузке подключено трехфазное ФКУ на базе каткона со следующими эквивалентными сосредоточенными параметрами (на одну фазу):  $L_{FCD} = 9,4$  мГн,  $C_{FCD} = 43$  мкФ,  $R_{FCD} = 0,05$  Ом,  $G_{FCD} = 0$  См (значением  $G_{ФКУ}$  пренебрегаем, так как оно несоизмеримо мало по сравнению с остальными параметрами). Фазы ФКУ соединены по схеме «звезда с изолированной нейтралью». Отметим, что наличие ФКУ на основе каткона с такими параметрами позволяет повысить коэффициент мощности в точке общего присоединения на 20 %.

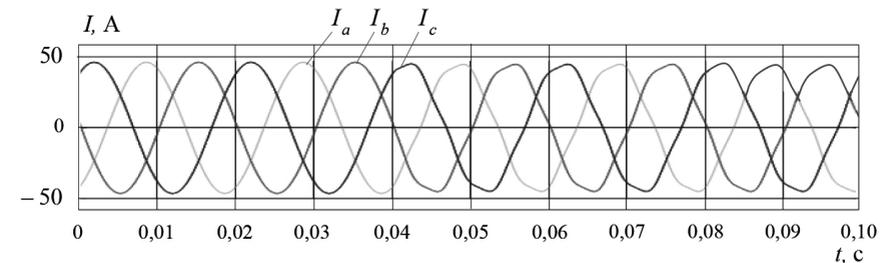
ФКУ отключается от сети с помощью ключа «Breaker», имитирующего трехфазный высоковольтный выключатель, контакты которого размыкаются через 2 периода промышленной частоты ( $T = 0,04$  с) от начала наблюдения. Осциллограммы изменения напряжений и токов в течение переходного процесса при отключении ФКУ представлены на рис. 3 – 6.

Анализ графиков переходных процессов позволяет сделать следующие выводы:

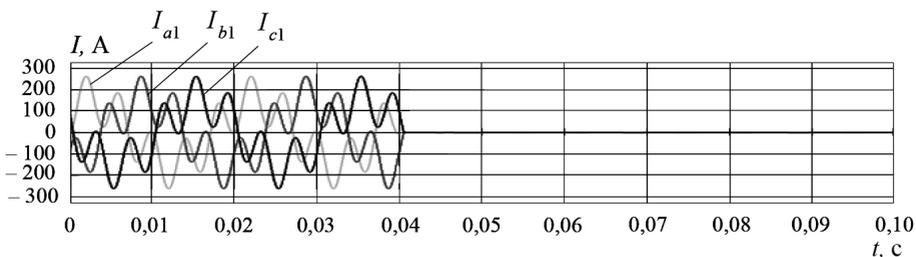
– использование трехфазного ФКУ на основе каткона в установившемся режиме (до коммутации) обеспечивает компенсацию реактивной



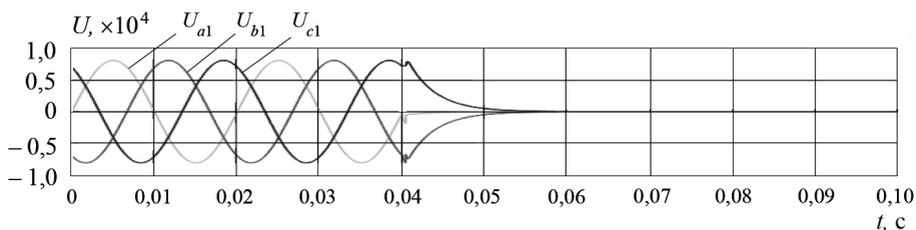
**Рис. 3.** Осциллограммы фазных напряжений на нагрузке при отключении ФКУ на базе каткона от сети



**Рис. 4.** Осциллограммы токов в фазах нагрузки при отключении ФКУ на базе каткона от сети



**Рис. 5.** Осциллограммы токов в фазах ФКУ на базе каткона при отключении от сети



**Рис. 6.** Осциллограммы фазных напряжений на ФКУ на базе каткона при отключении от сети

мощности и фильтрацию гармонической составляющей ( $k = 5$ ): достигается снижение степени несинусоидальности напряжения (рис. 3) и тока в нагрузке (рис. 4);

- отключение ФКУ на основе каткона приводит к ухудшению показателей качества электроэнергии: снижению коэффициента мощности в точке общего присоединения ФКУ на базе каткона и нагрузки, увеличению доли гармонической составляющей в токе (рис. 4) и напряжении (рис. 3) на нагрузке;

- при отключении ФКУ на базе каткона от сети в течение переходного процесса не возникает сверхтоков (рис. 5) и перенапряжений (рис. 6).

В результате проведенного исследования предложена математическая модель системы «ФКУ на базе каткона – электрическая сеть с изолированной нейтралью» для анализа переходных процессов при коммутациях ФКУ на базе каткона с сетью; реализовано имитационное компьютерное моделирование переходных процессов, возникающих при отключении ФКУ на базе каткона от электрической сети с изолированной нейтралью. Полученные осциллограммы переходных процессов демонстрируют, что отключение ФКУ на базе каткона не приводит к возникновению неблагоприятных режимов.

## Список литературы

1. **Волков И.В., Закревский С.И.** Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке // *Электричество*. 1984. № 10.
2. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzianov F.N.** Algorithm of definition of parameters of katkon – element of optimization of electrical networks modes // *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62. № 13.
3. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzianov F.N.** Coil-capacitor as a basis for creating efficient devices for distribution power networks / *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2018*. Hamburg, 2018.
4. **Демирчян К.С., Гусев Г.Г.** Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности // *Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт*. 1987. № 2. С.
5. **Reeves R.** Inductor-capacitor hybrid // *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1975. Vol. 122. №11.
6. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Михеев Д.В.** Математическое и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона // *Электричество*. 2014. №11.
7. **Патент 2714925 РФ.** Фильтрокомпенсирующее устройство / **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Карпунина М.В., Кваснюк А.А., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н.** // *БИ*. 2020. № 6.
8. **Михеев Д.В., Кулешова Г.С.** Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента // *Промышленная энергетика*. 2020. № 12.
9. **Кулешова Г.С., Михеев Д.В.** Моделирование режимов работы ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента при изменении параметров электрической сети / *Фёдоровские чтения. 2021: LI Междунар. научно-практич. конф. с элементами научной школы*. М.: Издательский дом МЭИ, 2021.
10. **Kuleshova G.S., Mikheev D.V.** Modeling the operating modes of a FCD based on a hybrid inductive-capacitive element in power supply systems / *XV International IEEE scientific and technical conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics 2021)*. Omsk, 2021.

# УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

*Погребисский М.Я., Петрович М.Т.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Электрические печи сопротивления (ЭПС) широко применяются в различных технологических процессах термической и термохимической обработки, обжига керамики, спекания и других. Необходимым условием достижения требуемого качества продукции является регулирование температурного режима печи с высокой точностью.

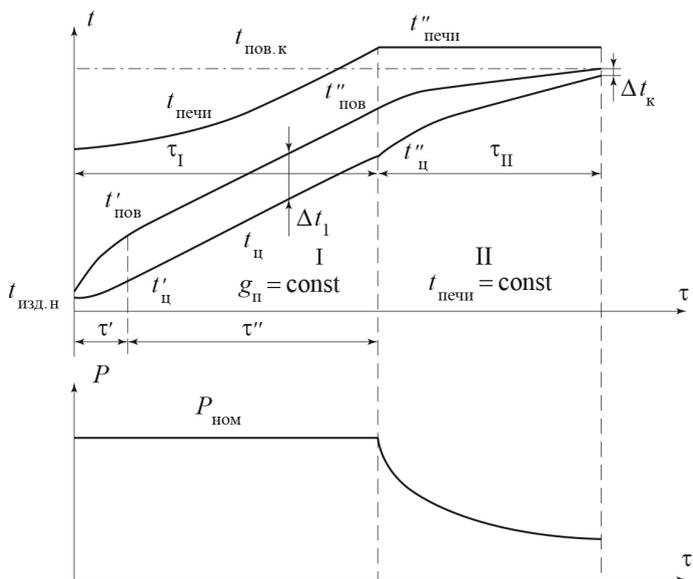
Все разрабатываемые в настоящее время ЭПС оснащаются системами автоматического регулирования температуры [1], осуществляющими поддержание температуры печи на заданном уровне или ее программное регулирование, то есть изменение по заранее заданному графику. Такие системы строятся по замкнутому принципу; в качестве датчика обратной связи, как правило, используется термоэлектрический преобразователь (термопара), управляющим воздействием на температурный режим является изменение вводимой в печь мощности, функцию исполнительного устройства наиболее часто выполняет тиристорный регулятор напряжения.

Необходимо отметить, что непосредственно температура нагреваемого изделия (загрузки) измеряется и используется в качестве сигнала обратной связи в системе регулирования температуры крайне редко. Это связано с особенностями динамических характеристик ЭПС, как неоднородного в тепловом отношении объекта (показатели качества регулирования ухудшаются при использовании в качестве сигнала обратной связи температуры загрузки), а также с трудностями установки датчика на загрузку и его сохранности. Как правило, в печах с преобладанием теплообмена излучением (средне- и высокотемпературных) датчик обратной связи (термопара) устанавливается вблизи футеровки печи. При такой установке датчик фактически измеряет температуру печи, определяющую процессы нагрева, эта температура довольно близка к температуре внутренней поверхности футеровки. В печах с преобладанием конвективного теплообмена (низкотемпературных, в том числе

с принудительной циркуляцией атмосферы) определяющей является температура среды на входе в загрузку, поэтому и датчик обратной связи устанавливается в потоке воздуха или газа на входе в загрузку.

Таким образом, регулирование температуры загрузки осуществляется не напрямую, а посредством стабилизации или программного изменения определяющей температуры – температуры печи или (в печах с преобладанием конвективного теплообмена) температуры среды. При этом, в отсутствие экзотермических реакций в материале загрузки, уставка регулятора, то есть задание температуры печи (или среды)  $t_{\text{печи}}$ , всегда больше, чем заданное конечное значение температуры нагрева изделия  $t_{\text{нг.к}}$ .

Процесс нагрева загрузки (рис. 1) в печи периодического действия состоит из двух этапов; на этапе I режим нагрева близок к режиму постоянного теплового потока на поверхности загрузки ( $q_{\text{II}} = \text{const}$ ), на этапе II (после выхода температуры печи  $t_{\text{печи}}$  на задание регулятора)



**Рис. 1.** Изменение температуры печи  $t_{\text{печи}}$ , поверхности нагреваемого изделия  $t_{\text{пов}}$  и его центра  $t_{\text{ц}}$  и потребляемой мощности  $P$  при нагреве теплотехнически массивного изделия в ЭПС периодического действия

нагрев происходит при постоянной температуре печи.

Важнейшим вопросом является выбор задания тпечи при известной тнг.к.; именно разностью тпечи и тнг.к. определяются при прочих равных условиях время нагрева загрузки до тнг.к. (и, следовательно, производительность печи) и перепад температуры между поверхностью и центром загрузки  $\Delta t$  в процессе нагрева. Чем больше разность тпечи–тнг.к., тем меньше время нагрева, но больше  $\Delta t$ . При этом от перепада температуры по сечению загрузки  $\Delta t$  как в регулярном режиме ( $\Delta t_1$ ), так и в конце процесса нагрева ( $\Delta t_k$ ) существенно зависит качество продукции, и превышение допустимых для заданного технологического процесса значений  $\Delta t$  ведет к браку. Из опыта эксплуатации среднетемпературных ЭПС периодического действия превышение задания тп и над тнг.к. при нагреве массивных загрузок составляет в среднем 30 – 50 °С.

Целесообразно оснащение регуляторов температуры ЭПС функцией автоматического выбора уставки (задания температуры печи) по известной конечной температуре нагрева загрузки при различных свойствах и размерах загрузки.

Можно предложить следующий алгоритм функционирования усовершенствованного регулятора.

Исходными данными для определения уставки являются заданная конечная температура нагрева  $t_{нг.к.}$ , максимально допустимый температурный перепад по сечению загрузки  $\Delta t_{max}$ , допустимый температурный перепад в конце нагрева  $\Delta t_{кдоп}$ , теплофизические свойства материала загрузки (теплопроводность  $\lambda$ , удельная теплоемкость  $c$ , плотность  $\gamma$ ) и ее геометрические размеры.

Исходя из выражения связи  $\Delta t$  с плотностью теплового потока на поверхности загрузки  $q_{п}$  для регулярного режима [2], рассчитывается значение плотности теплового потока для этапа нагрева I (этапа с постоянным тепловым потоком). Так, для протяженной цилиндрической загрузки радиусом  $R$  плотность теплового потока для этого этапа нагрева составит:

$$q_{п} = \frac{2\lambda\Delta t_{max}}{R}. \quad (1)$$

Умножив на площадь поверхности загрузки и разделив на 0,7 (усредненное значение КПД холостого хода), получим значение потребляемой печью мощности для этапа нагрева I:

$$P_1 = \frac{q_{\text{п}}}{0,7 \cdot 2\pi R h}, \quad (2)$$

где  $h$  – осевой размер загрузки.

Если расчетная мощность  $P_1$  оказывается больше номинальной мощности печи  $P_{\text{ном}}$ , то устанавливается равенство  $P_1 = P_{\text{ном}}$ .

По закону разности четырех степеней абсолютной температуры рассчитывается температура печи в конце этапа I (заданная температура)  $t_{\text{зад}}$ :

$$t_{\text{зад}} = 100^4 \sqrt{\frac{q_{\text{п}}}{C_{\text{пр}}} + \left(\frac{t''_{\text{пов}} + 273}{100}\right)^4} - 273, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент теплообмена излучением печи и загрузки;  $t''_{\text{пов}}$  – температура поверхности загрузки в конце этапа I, определяемая как  $0,85t_{\text{нг.к}}$ . Если рассчитанное значение  $t_{\text{зад}}$  превышает паспортную температуру печи  $t_{\text{max}}$ , то принимается  $t_{\text{зад}} = t_{\text{max}}$ , и по закону разности четырех степеней рассчитывается скорректированное значение  $q_{\text{п}}$  и затем по формуле (2) –  $P_1$ .

Нагрев на этапе I выполняется при постоянной мощности  $P_1$  до достижения температурой печи значения  $t_{\text{зад}}$  (температура измеряется датчиком – термопарой). По достижении  $t_{\text{зад}}$  регулятор рассчитывает скорректированное задание для этапа II (этапа нагрева при постоянной температуре печи), исходя из допустимого значения температурного перепада в конце процесса нагрева  $\Delta t_{\text{к}}$ .

Для такого расчета используются аппроксимированные полиномами аналитические решения дифференциального уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода (графики Будрина [3]). Рассчитываются время  $\tau_{\text{II}}$  нагрева поверхности изделия от  $t''_{\text{пов}}$  до  $t_{\text{нг.к}}$  при постоянной температуре печи и конечное значение температурного перепада  $\Delta t_{\text{к}}$ . За температуру печи при расчете принимается  $t_{\text{зад}}$  с этапа I нагрева, за начальные условия –  $t''_{\text{пов}}$  для поверхности и  $(t''_{\text{пов}} - \Delta t_{\text{max}})$  для центра. Если рассчитанное значение  $\Delta t_{\text{к}}$  превышает допустимое, регулятор корректирует задание  $t_{\text{зад}}$ , это делается методом

последовательных приближений.

Нагрев загрузки на этапе II выполняется при работе регулятора по ПИ- или ПИД-закону с рассчитанным вышеуказанным образом заданием температуры печи  $t_{зад}$  и отсчетом времени  $\tau_{II}$ . В момент окончания промежутка  $\tau_{II}$  процесс нагрева завершается; если не предусмотрена выдержка при постоянной температуре, то нагреватели отключаются и (или) подается сигнал персоналу на разгрузку печи.

Предложенный алгоритм обеспечивает минимально возможную продолжительность нагрева изделия в печи (максимальную производительность) при соблюдении ограничений по максимальному и конечному значениям температурного перепада по сечению.

На кафедре ЭППЭ НИУ «МЭИ» также разработаны программные решения в среде Codesysv2.3, позволяющие реализовать предложенный регулятор на базе программируемого логического контроллера ПЛК150 и панели оператора СП307-Б

#### **Список литературы**

1. **Рубцов В.П., Щербаков А.В.** Системы автоматического управления электрическими печами сопротивления. М.: Изд-во МЭИ, 2015.
2. **Погребисский М.Я., Батов Н.Г.** Расчет электрических печей сопротивления. М.: Изд-во МЭИ, 2012.
3. **Свенчанский А.Д.** Электрические промышленные печи. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. М.: Энергия, 1975.

# МЕТОД МНОГОМЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Курилин С.П., Денисов В.Н.*

*Смоленск, Смоленский филиал МЭИ*

Материалы доклада касаются метода диагностики и прогнозирования технического состояния наиболее массового вида электромеханических систем – асинхронных электродвигателей (АЭД). В отношении методов и средств диагностики в настоящее время предпринято большое количество разноплановых исследований. В целом их характеризует следующее.

Выполненные работы реализуют «внешний» подход к решению задачи, заключающийся в выработке диагностического заключения на основании анализа изменений внешних характеристик электродвигателя в одном из эксплуатационных режимов. Обычно им является номинальный режим, а внешними проявлениями неисправности служат изменения синусоидальности токов, асимметрия токов, пульсации токов или момента, повышенные вибрации корпуса, повышенная интенсивность внешнего теплового или электромагнитного поля. Вместе с тем, связь внутренних эксплуатационных изменений конструкции АЭД с их внешними проявлениями является нечёткой в том смысле, что эти проявления не указывают чётко ни на одну из причин или их комбинацию. В этом отношении знаковыми являются работы, привлекающие к исследованию интеллектуальные методы работы с нечёткой информацией.

Выполненные работы базируются на двумерных моделях классической теории электрических машин, что не позволяет им адекватно отображать ситуации многомерного распределения электромагнитных величин, которые возникают при неравномерном эксплуатационном старении конструкции АЭД.

Существующие методы диагностики не дают прогнозных характеристик технического состояния.

Перечисленные причины обусловили необходимость разработки бо-

лее совершенных методов диагностики, названных топологическими. Топологические методы опираются на результаты тестирования активной части АЭД импульсными воздействиями и на многомерные модели АЭД. Кроме того, топологическая диагностика позиционируется как эксплуатационная. Это означает, что в задачу диагностики входит не столько выявление повреждений конструкции АЭД, сколько оценка текущего технического состояния объекта и прогноз технического состояния на предстоящую эксплуатацию. Основные научные и прикладные работы по топологической диагностике выполнены в 2018 – 2022 гг. [1].

Базовыми положениями топологической диагностики, принятыми в качестве аксиом, являются следующие утверждения:

- конструкция АЭД по мере эксплуатации стареет, теряя при этом свои физические свойства. Старение может быть равномерным (однородным) или фрагментарным (неоднородным);

- под действием эксплуатационного старения АЭД постепенно утрачивает свою техническую эффективность, заложенную в изделие при его изготовлении;

- все эксплуатационные изменения физических свойств активной части АЭД\* изменяют также свойства его электрических и магнитных цепей, а следовательно – изменяют элементы параметрической матрицы машины. Наиболее распространёнными проявлениями эксплуатационного старения АЭД являются фрагментарное или однородное снижение магнитных свойств сердечников, фрагментарное окисление или разрушение электрических соединений в обмотках, фрагментарное разрушение изоляции проводников или листов сердечников, появление раковин и трещин в литых обмотках, нарушение радиальной или аксиальной равномерности воздушного зазора;

- параметрическая матрица адекватно отображает техническое состояние активной части АЭД и является её математической моделью. Получить информацию о техническом состоянии активной части АЭД можно путём фиксации эксплуатационных изменений его параметрической матрицы.

Для количественной оценки эксплуатационных изменений вводится понятия эталонного и эксплуатационного состояний объекта, которые соответствуют отсутствию эксплуатационных изменений и их наличию. Как правило, эталонное состояние объекта и его параметрической матрицы ассоциируется с моментом выпускных испытаний изделия

$t = 0$ , а эксплуатационное – с некоторой длительностью  $t$  эксплуатации изделия. В ходе эксплуатационной диагностики фиксируются и оцениваются различия характеристик текущего эксплуатационного и эталонного состояний.

Задачей доклада является представление метода многомерной диагностики и прогнозирования технического состояния электромеханической системы. Метод основан на исследовании параметрической матрицы электромеханической системы путём воздействия на неё импульсными функциями.

Носителем информации о текущем техническом состоянии трёхфазного АЭД с маркировкой фаз  $C, A, B$  является матрица Грина размерностью  $3 \times 3$  элемента. Матрица Грина формируется путем воздействий на объект импульсными векторами напряжения, в соответствии с выражением:

$$G = Z^{-1} \delta(\tau) U,$$

где  $Z$  – параметрическая матрица АЭД;

$$U = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

– матрица распределения импульсных напряжений;  $\tau$  – время, отсчитываемое с момента подачи импульса;  $\delta(\tau)$  – дельта-функция.

Элементами матрицы Грина являются импульсные переходные функции:

$$G = \begin{pmatrix} k_{AC}(\tau) & k_{BC}(\tau) & k_{CC}(\tau) \\ k_{AA}(\tau) & k_{BA}(\tau) & k_{CA}(\tau) \\ k_{AB}(\tau) & k_{BB}(\tau) & k_{CB}(\tau) \end{pmatrix},$$

среди которых выделяется группа из трёх собственных функций:

$$k_{AA}(\tau) = -k_{AB}(\tau), \quad k_{BB}(\tau) = -k_{BC}(\tau), \quad k_{CC}(\tau) = -k_{CA}(\tau)$$

и трёх взаимных функций

$$k_{AC}(\tau), \quad k_{BA}(\tau), \quad k_{CB}(\tau).$$

Собственные функции определяют фазную и межфазную электрическую проводимость в АЭД и характеризуют параметрические свойства двумерной рабочей области векторного пространства.

Взаимные функции определяют взаимное индуктивное влияние ортогональных фаз АЭД, что характерно для физически неоднородных и повреждённых объектов. Эти функции характеризуют параметрические свойства одномерного подпространства 0, ортогонального рабочей области.

В том случае, когда фиксируется пропорциональная матрица Грина:

$$G = k(\tau)U,$$

где

$$\begin{aligned} k_{AA}(\tau) &= -k_{CA}(\tau) = -k_{AB}(\tau) = k_{BB}(\tau) = -k_{BC}(\tau) = \\ &= k_{CC}(\tau) = k(\tau), \\ k_{AC}(\tau) &= k_{BA}(\tau) = k_{BC}(\tau) = 0, \end{aligned}$$

полученный результат свидетельствует о параметрической однородности и физической исправности АЭД. Если при этом функция  $k(\tau)$  не вышла за установленные техническим регламентом пределы, то можно констатировать техническую исправность и работоспособность АЭД.

В том случае, когда фиксируется неравенство

$$G \neq k(\tau)U,$$

необходим детальный анализ отклонений импульсных переходных функций от эталонных значений и сравнение их с предельными отклонениями, сформированными экспертным путём.

В обоих случаях оценка темпов приближения импульсных переходных функций к предельным значениям, проводимая в ходе эксплуатации, позволяет дать прогнозные оценки риска продолжения эксплуатации и остаточного ресурса АЭД.

При практической диагностике в матрице Грина сохраняются только амплитуды переходных функций, а сама она ассоциируется со сроком эксплуатации изделия  $t$ .

Таким образом, формируется актуальная на момент времени  $t$  матрица Грина:

$$G_t = \begin{pmatrix} k_{ACm} & k_{BBm} & k_{CCm} \\ k_{AAm} & k_{BAm} & k_{CCm} \\ k_{AAm} & k_{BBm} & k_{CBm} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

позволяющая судить об однородности, глубине и темпах эксплуатационного старения рабочей области. Отметим, что в эталонном состоянии рабочая область и матрица Грина также однородны:

$$G_0 = k_{0m} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Мерой однородности и глубины эксплуатационного старения является матрица текущих отклонений

$$\Delta G_t = |G_0 - G_t|, \quad (2)$$

причём сопоставление её элементов с предельным значением  $\Delta_{\max}$  позволяет решить вопрос о целесообразности продолжения эксплуатации изделия. Кроме того, показатели темпов эксплуатационного старения

$$r(\Delta G_t) = \frac{1}{t} \Delta G_t \quad (3)$$

дают прогнозную характеристику на предстоящую эксплуатацию изделия  $\Delta t$ . Матрица-прогноз эксплуатационных измерений, актуальная на момент времени  $t$ , выглядит следующим образом:

$$\Delta G_{t+\Delta t} = \left(1 - \frac{\Delta t}{t}\right) \Delta G_t. \quad (4)$$

Следует подчеркнуть, что матричные характеристики (1) – (4) дают объективную и актуальную информацию о техническом состоянии активной части изделия, глубине и характере эксплуатационных изменений, темпах эксплуатационного старения и глубине предстоящих изменений по трём измерениям векторного пространства параметрической матрицы объекта. Наличие объективной информации позволяет принимать обоснованные эксплуатационные решения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00283*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00096, <https://rscf.ru/project/22-61-00096/>*

### **Список литературы**

1. **Kurilin S., Fedulov Y., Sokolov A.** Scientific substantiation of methods for topological diagnostics of electrical equipment / 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021.

## **МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ ФАЗ В ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ ФЕРРИТА ГРАНАТА ВБЛИЗИ ТОЧКИ КОМПЕНСАЦИИ**

***Ветошко П.М.<sup>1</sup>, Бержанский В.Н.<sup>2</sup>, Полулях С.Н.<sup>2</sup>, Суслов Д.А.<sup>1</sup>,  
Маширов А.В.<sup>1</sup>, Шавров В.Г.<sup>1</sup>, Павлюк Е.И.<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup>Москва, Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН,*

*<sup>2</sup>Симферополь, КФУ им. В.И. Вернадского*

Среди магнитных материалов особое место занимают ферромагнетики с точкой компенсации [1]. Разный ход температурных зависимостей намагниченностей противоположно направленных магнитных подрешеток приводит к появлению в таких магнетиках особой температурной точки – точки компенсации, то есть температуры, при которой спонтанная намагниченность материала обращается в ноль. Во внешнем магнитном поле в окрестности точки компенсации возникает неколлинеарная магнитная фаза, обусловленная скосом намагниченностей различных подрешеток [2, 3]. Возрождение интереса к материалам с магнитной точкой компенсации обусловлено как особенностями спиновой динамики [4], так и новыми возможностями практических применений в спинтронике [5], сенсорике [6] и при сверхбыстром перемагничивании [7] ферромагнетиков с точкой компенсации.

К магнитным диэлектрикам, обладающим точкой компенсации, от-

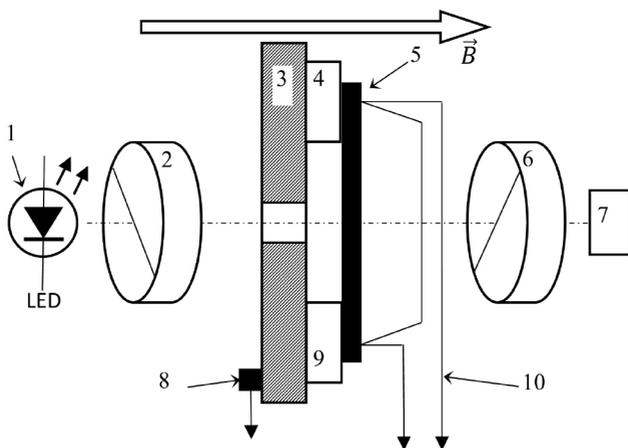
носятся редкоземельные ферриты гранаты, содержащие парамагнитные ионы в додекаэдрической подрешетке. В частности, феррит гранат гадолиния  $Gd_3Fe_5O_{12}$  имеет точку компенсации  $T_c \approx 287$  К. Намагниченность железа в этом соединении обусловлена сильным отрицательным обменом тетраэдрических и октаэдрических ионов  $Fe^{3+}$ . Магнитная подрешетка гадолиния является «слабой» – обменные взаимодействия между ионами  $Gd^{3+}$  практически отсутствуют и намагниченность гадолиния обусловлена отрицательным обменом с ионами железа  $Fe^{3+}$ . При температурах, ниже точки компенсации преобладает намагниченность подрешетки гадолиния, а выше точки компенсации – результирующая намагниченность железных подрешеток.

Экспериментальные исследования температурной зависимости намагниченности в таких соединениях связаны с проблемами, обусловленными малой намагниченностью соединения вблизи точки компенсации. В случае эпитаксиальных пленок ферритов гранатов дополнительные сложности возникают при использовании парамагнитной подложки, например, на основе гадолиний галлиевого граната. С другой стороны, для исследования магнитных свойств эпитаксиальных пленок ферритов гранатов широко применяются методы, использующие магнитооптический эффект Фарадея. При этом основной вклад в поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света вносит подрешетка железа и вкладом намагниченности гадолиния в первом приближении можно пренебречь.

Кроме того, при исследовании фазовых диаграмм подобных соединений в сильных магнитных полях возникают дополнительные экспериментальные сложности, связанные с возникновением и регистрацией неколлинеарных магнитных фаз в сравнительно узком температурном диапазоне.

В статье для магнитооптической визуализации магнитных фаз в тонких магнитных пленках предлагается подход, основанный на использовании магнитооптического эффекта Фарадея в специально сформированном температурном градиенте.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В установке используется термостатирующий столик, изготовленный из меди. Постоянная температура  $T$  обеспечивается термостатирующим устройством (на рис. 1 не показано). На термостатирующем столике расположено два элемента Пельтье, обеспечивающие температуры  $T_1$  и



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – термостатирующий столик; 4 – элемент Пельтье; 5 – исследуемый образец; 6 – анализатор; 7 – микроскоп; 8 – датчик температуры; 9 – элемент Пельтье; 10 – дифференциальная термопара

$T_2$  так, что  $T_1 < T < T_2$ . Исследуемый образец помещается на элементы Пельтье в результате чего формируется градиент температур в плоскости образца.

Для магнитооптической визуализации распределения нормальной компоненты намагниченности в образце используется источник света, поляризатор, анализатор и микроскоп. Вся система помещается в криостатирующую систему GFSG-510-2K-SCM10T-VTI29 со сверхпроводящим магнитом, обеспечивающим магнитные поля до 10 Т. Постоянное магнитное поле направлено нормально плоскости пленки.

Для проведения экспериментов использован образец эпитаксиальной пленки феррита граната состава  $(\text{BiGd})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  толщиной 5 мкм. Висмут в редкоземельной подрешетке усиливает фарадеевское вращение, однако разбавление гадолиния висмутом приводит к снижению точки компенсации. Диамагнитное разбавление железа алюминием и галлием, наоборот, точку компенсации повышает. Для исследованного образца точка компенсации оказалась примерно равна  $T_c \approx 333\text{K}$ . При эпитаксиальном синтезе в качестве подложки использована пластина диамагнитного  $(\text{CaMgZr})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  граната, ориентированная в плоскости (111). Анализ магнитного состояния пленки методом ФМР показал, что

пленка характеризуется магнитной анизотропией типа «легкая ось».

В отсутствие внешнего магнитного поля при температуре, близкой к точке компенсации в образце формируется крупноблочная доменная структура. Намагниченность в доменах направлена вдоль нормали к плоскости пленки, а домены различаются направлением намагниченности. Образец в полидоменном состоянии используется для настройки прибора: поляризатор и анализатор устанавливаются так, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения доменной структуры.

В условиях, когда температура в центре образца соответствует точке компенсации, а магнитное поле превышает порог коэрцитивности (порядка 2 мТ), наблюдаемая картина представлена двумя областями различной яркости. Эти области соответствуют направлению намагниченности встречно магнитному полю ниже точки компенсации и вдоль магнитного поля выше точки компенсации. В центральной части образца, вдоль температурной линии, соответствующей точке компенсации, формируется компенсационная доменная граница. В полях более 2,8 Т наблюдаемая картина становится пространственно неоднородной; выделяются светлые и темные области, соответствующие противоположному направлению намагниченности. Эти области разделены переходной областью, соответствующей неколлинеарной фазе. При дальнейшем увеличении поля площадь области, соответствующей неколлинеарной фазе, растет и в полях свыше 3 Т область неколлинеарной фазы заполняет все пространство наблюдения и картина вновь становится однородной.

Отсутствие неколлинеарной фазы в полях меньше 2,8 Т хорошо согласуется с теоретическими результатами [3]. Проведенный в [3] анализ показал, что при намагничивании пленки с анизотропией типа «легкая ось» существует некоторое критическое поле, ниже которого неколлинеарная фаза не формируется.

### **Выводы**

Использование температурного градиента в плоскости пленки позволяет одновременно наблюдать области, соответствующие различным магнитным фазам. В полях ниже критического наблюдаются две коллинеарные магнитные фазы, разделенные компенсационной доменной границей. В полях выше критического, наряду с коллинеарными магнитными фазами, экспериментально наблюдается область неколлинеарной магнитной фазы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-22-00754*

### **Список литературы**

1. Белов К.П. УФН 166(6), 669 (1996).
2. Clark A., Callen E. J. Appl. Phys. 1968. 39 (13).
3. Звездин А.К., Попков А.Ф. ФТТ. 1974. 16 (4).
4. Davyдоваetal M.D. J. Phys.: Condens.Matter. 2019. 32 01LT01.
5. Geprägs S., Kehlberger A., Colettaetal F.D. Nat Commun. 2016. 7, 10452.
6. González J.A., Andrés J.P., López A. Sensors. 2021. 21, 5615.
7. Medapalli R., Rzdolski I., Savoinietal M. Eur. Phys. J. 2013. B. 86.

## **ЭФФЕКТ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ ФЕРРИТА ГРАНАТА ВИСМУТА**

***Авдеенко Д В., Бержанский В.Н., Ветошко П.М.,  
Полулях С.Н., Попов В.В., Семук Е.Ю.***

*КФУ им. В. И. Вернадского*

Успехи по возбуждению спиновой динамики с помощью мощных оптических импульсов стимулируют возрождение интереса к исследованию как фотоиндуцированных, так и оптомагнитных эффектов в магнитных материалах [1]. К материалам, демонстрирующим способность изменять магнитные свойства под действием света относятся катион-замещенные ферриты гранаты [2]. Для эпитаксиальных пленок таких гранатов в слабых, близких к переходу в полидоменное состояние, магнитных полях экспериментально обнаружено фотоиндуцированное изменение спектров ФМР [3]. Экспериментально показано, что наблюдаемый эффект не связан с тепловым действием света. Предполагается, что он обусловлен известным ранее эффектом фотоиндуцированного изменения магнитной анизотропии.

Во внешнем магнитном поле  $\mathbf{H}$  намагниченность направлена вдоль эффективного магнитного поля, которое определяется минимумом свободной энергии  $F$ :

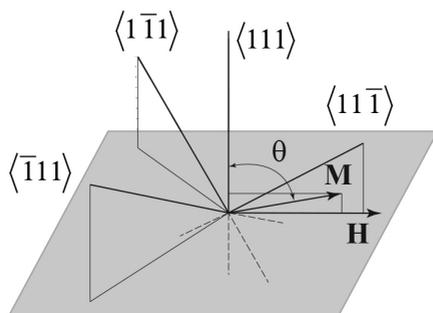
$$F = -(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}) - 4\pi M^2 \cos^2\theta + K_u \sin^2\theta + F_{\text{cub}}. \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое соответствует взаимодействию намагниченности  $\mathbf{M}$  с внешним магнитным полем  $\mathbf{H}$ , второе описывает вклад поля размагничивания, третье – энергия одноосной анизотропии и последнее – энергия кубической магнитной анизотропии, обусловленная кубической симметрией кристаллической структуры ферритов гранатов,  $\theta$  – угол между намагниченностью и нормалью к плоскости пленки. В случае эпитаксиальных пленок ферритов гранатов одноосная анизотропия формируется в процессе синтеза образца и может быть типа «легкая ось» и «легкая плоскость». Явный вид выражения для кубической анизотропии  $F_{\text{cub}}$  зависит от выбора системы координат. В системе координат, связанной с образцом ось  $z$  удобно выбрать вдоль нормали к плоскости образца. Для пленки, ориентированной в плоскости (111) кубического кристалла, достаточно громоздкое выражение для  $F_{\text{cub}}$  можно найти, например, в [4].

Исследование фотомагнитных эффектов проводилось на пленках диамагнитно замещенного феррита граната висмута  $\text{Bi}_{1-x} R_x \text{Fe}_{1-y} \text{Me}_y \text{O}_{12}$ , где  $R = \text{Y, Lu, Pr, Me} = \text{Sc, Ga}$ , которые обладают значительными магнитооптическими свойствами. Пленки выращивались методом жидкофазной эпитаксии на монокристаллических подложках  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  толщиной 500 мкм с ориентацией (111). В результате ФМР экспериментов для исследованных образцов установлено, что кубическая анизотропия приводит к направлению легкого намагничивания вдоль направлений типа  $\langle 111 \rangle$  [3]. В случае пленки (111) одно из направлений типа  $\langle 111 \rangle$  нормально плоскости образца и совпадает с осью симметрии третьего порядка (рис. 1). Три других направления типа  $\langle 111 \rangle$  выходят из плоскости пленки на угол примерно равный  $19,47^\circ$ .

Для исследования магнитной анизотропии в пленках ферритов гранатов, ориентированных в плоскости (111), в [5] предложен прибор, использующий магнитооптический эффект Фарадея (рис. 2).

С помощью двух пар скрещенных катушек Гельмгольца (3, 4) создается магнитное поле, которое медленно, с угловой скоростью примерно 1 рад/с, вращается в плоскости пленки (5). Если направление внешнего



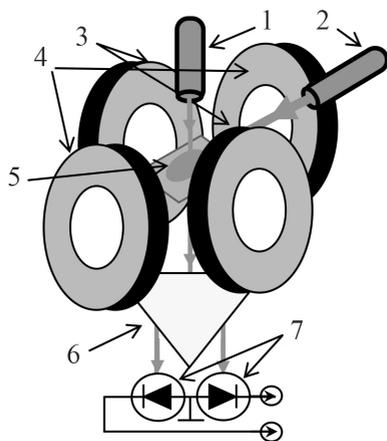
**Рис. 1.** Расположение осей типа  $\langle 111 \rangle$  в пленке  $(111)$

магнитного поля в плоскости совпадает с проекцией направления типа  $\langle 111 \rangle$  на плоскость пленки (рис. 1), то кубическая анизотропия приводит к максимальному выходу вектора намагниченности из плоскости пленки – появляется  $z$ -компонента намагниченности. При дальнейшем повороте поля в плоскости  $M_z$  уменьшается и обращается в ноль при повороте на угол  $30^\circ$ . Затем  $M_z$  меняет знак и достигает максимального значения при повороте на угол  $60^\circ$  и так далее.

Для регистрации  $M_z$  использован магнитооптический эффект Фарадея – поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света на угол

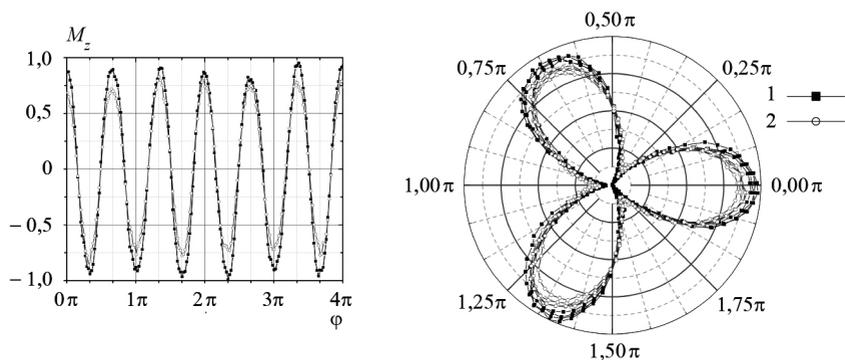
$$\Theta = v \cdot h \cdot M_z, \quad (2)$$

где  $v$  – угол удельного фарадеевского вращения, зависящий от свойств материала;  $h$  – толщина пленки. Для измерения значения  $M_z$  используется луч света измерительного лазера (1) длиной волны 680 мкм, падающий на образец вдоль нормали к плоскости. После прохождения через образец (5) свет попадает в призму Волластона (6), в которой луч линейно поляризованного света расщепляется на два так, что отношение интенсивностей этих лучей определяется углом поляризации падающего света. Интенсивности лучей, прошедших через призму Волластона, регистрируются с помощью двух фотодетекторов (7), которые подключены к измерительному устройству. Система настроена таким образом, что в отсутствие вращения плоскости поляризации света в образце сигнал на выходе устройства равен нулю, а выходной сигнал пропорционален углу фарадеевского вращения  $\Theta$  и в конечном итоге пропорционален нормальной компоненте намагниченности  $M_z$  в соответствии с (2).



**Рис. 2.** Схема магнитооптического анизометра: 1 – измерительный лазер (680 нм, 0,5 мВт); 2 – лазер накачки (680 нм, 45 мВт); 3, 4 – скрещенные катушки Гельмгольца; 5 – пленка феррита граната; 6 – призма Волластона; 7 – регистрирующие фотодетекторы

На рис. 3 в качестве примера приведена экспериментальная зависимость  $M_z$  компоненты намагниченности в пленке  $\text{BiY}_2\text{Fe}_{4.4}\text{Sc}_{0.6}\text{O}_{12}$  от угла  $\varphi$ , определяющего направление внешнего магнитного поля в ее плоскости до и во время действия оптической накачки мощностью



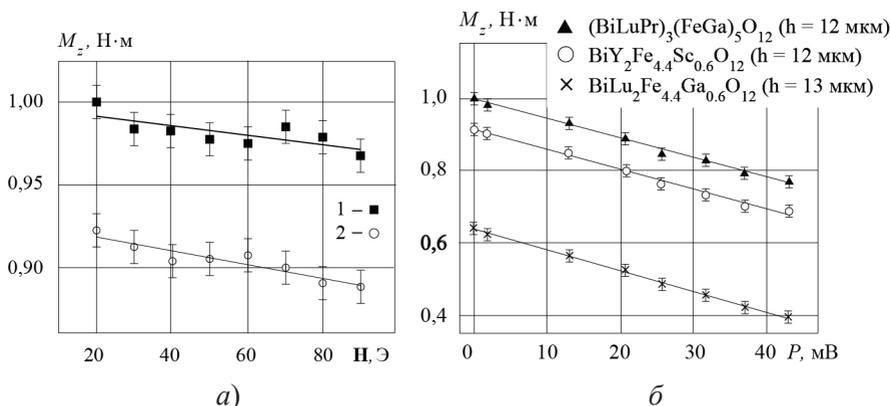
**Рис. 3.** Зависимость нормальной компоненты намагниченности  $M_z$  от угла  $\varphi$ , определяющего направление внешнего магнитного поля в плоскости образца эпитаксиальной пленки состава  $\text{BiY}_2\text{Fe}_{4.4}\text{Sc}_{0.6}\text{O}_{12}$ , до (1) и во время (2) облучения лазером накачки ( $P = 37$  мВт). На правом рисунке приведены те же зависимости в полярных координатах

$P \approx 37$  мВт. Фаза вращения поля выбрана таким образом, что угол  $\varphi = 0$  соответствует максимуму выходного сигнала. Данные рис. 3 демонстрируют 120-градусную симметрию, соответствующую оси симметрии третьего порядка, перпендикулярной плоскости образца. Незначительная асимметрия угловых зависимостей, связана с прямоугольной формой образца.

Луч света лазера накачки подавался на образец под большим, порядка  $60^\circ$ , углом к нормали образца с целью избежать дополнительной засветки регистрирующих фотоэлементов. Зависимость 2 на рис. 3 демонстрирует фотоиндуцированное уменьшение  $M_z$  компоненты намагниченности при использовании дополнительного облучения лазером накачки.

Значение  $M_z$  компоненты намагниченности, регистрируемое по угловой зависимости фарадеевского вращения, убывает с ростом вращающегося поля как в отсутствие, так и при наличии дополнительного оптического облучения (рис. 4,а). Приведенные результаты получены для образца эпитаксиальной пленки состава  $\text{BiY}_2\text{Fe}_{4.4}\text{Sc}_{0.6}\text{O}_{12}$  толщиной 12 мкм, который был использован в [3]. Увеличение мощности оптической накачки приводит к уменьшению угла фарадеевского вращения (рис. 4,б). Подобные результаты получены также для пленок примерно такой же толщины составов  $\text{BiLu}_2\text{Fe}_{4.38}\text{Ga}_{0.62}\text{O}_{12}$  и  $(\text{BiLuPr})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ .

Проведен численный анализ зависимости максимального значения  $M_z$  от величины вращающегося поля. При намагниченности насыщения  $4\pi M = 1700$  Гс, эффективном поле одноосной анизотропии  $H_u < 4\pi M$  и поле кубической анизотропии  $|H_{\text{cub}}| < 50$  Э (с учетом только первой константы) во внешнем магнитном поле менее 100 Э увеличение поля  $\mathbf{H}$  приводит к наблюдаемому (рис. 4,а) линейному спаду  $M_z$ . Скорость убывания  $M_z$  незначительно растет при уменьшении полей анизотропии. Однако изменение скорости убывания  $M_z$  при изменении поля кубической анизотропии в пределах  $5 < |H_{\text{cub}}| < 50$  Э меньше, чем погрешность настоящих экспериментов. Таким образом, экспериментально наблюдаемое уменьшение поперечной компоненты намагниченности при дополнительном оптическом облучении образца действительно может быть связано с фотоиндуцированной модификацией магнитной



**Рис. 4.** Зависимость максимального значения  $M_z$  компоненты намагниченности от величины вращающегося поля в пленке  $BiY_2Fe_{4.4}Sc_{0.6}O_{12}$  при мощности лазера накачки 37 мВт до (1) и во время (2) действия лазера накачки (а) и зависимость максимального угла фарадеевского вращения от мощности лазера накачки в поле  $H = 10$  Э для различно замещенных плёнок (б)

анизотропии. Однако в рамках предлагаемого подхода разделить вклады различных типов анизотропии не представляется возможным.

В отсутствие оптической накачки максимальный угол фарадеевского вращения  $\Theta$  различен для разных образцов. Для образцов примерно одинаковой толщины  $h$  согласно выражению (2) это может быть связано как с различием удельного угла вращения  $\nu$ , так и величины  $M_z$ , определяемой намагниченностью образца и полями магнитной анизотропии. Однако скорость уменьшения эффекта Фарадея  $\Theta = \Theta(P)$  для образцов разного состава оказалась примерно одинаковой (рис. 4, б). Уменьшение  $\Theta$  связано с уменьшением нормальной к плоскости намагниченности  $M_z$  вследствие фотоиндуцированной модификации магнитной анизотропии.

Для исследованных эпитаксиальных пленок ферритов гранатов фотоиндуцированная модификация анизотропии обусловлена формированием фотоактивных центров на базе примесей свинца  $Pb^{2+}$  и платины  $Pt^{4+}$ , входящих в состав пленки в процессе синтеза. В результате компенсации валентности возникают ионы железа  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{4+}$ , которые обладают большой спин-орбитальной связью. Ввиду примерно одинаковых технологических процессов синтеза концентрация примесей в образцах разного состава может быть примерно одинакова. Следовательно, примерно одинакова будет и скорость спада  $\Theta = \Theta(P)$ .

## Список литературы

1. Калашникова А.М., Киммель А.В., Писарев Р.В. УФН. 2015. 185 (10), 1064.
2. Stupakiewicz A., Szerenos K., Davydova M.D. et al. // Nat Commun. 2019. 10. 612.
3. Полулях С.Н., Семук Е.Ю., Звездин А.К. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2022. 115 (4). 224.
4. Jalali-Roudsar A.A., Denysenkov V.P., Khartsev S.I. // JMMM. 2005. 208, 15.
5. Vetoshko P.M., Volkovoy V.B., Zaloginetal V.N. // J. Appl. Phys. 1991. 70, 6298.

# МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТОПЛИВНОГО И МАСЛЯНОГО НАСОСОВ

*Вавилов В.Е.<sup>1</sup>, Иноземцев А.А.<sup>2</sup>, Лисовин И.Г.<sup>2</sup>, Бакиров А.А.<sup>1</sup>,  
Пронин Е.А.<sup>1</sup>.*

*<sup>1</sup>Уфа, УГАТУ, <sup>2</sup>Пермь, АО «Авиадвигатель»*

Традиционные авиационные топливные и масляные насосы обладают невысокой эффективностью. Топливные системы летательных аппаратов (ЛА) усложнены наличием дозатора и дополнительных ветвей рециркуляции топлива по причине превышения фактической подачи топлива топливным насосом по сравнению с потребным. В масляных системах наблюдается аналогичная проблема с повышенной подачей масла, что приводит к его утечке. В связи с этим большое внимание уделяется электрификации топливных и масляных систем ЛА, заключающейся в разработке и использовании электроприводов для насосов этих систем. Гибкое управление электроприводов открывает возможности подачи необходимого количества топлива или масла, а также способствует упрощению этих систем [1–3].

Проектирование и разработка авиационных электрических машин (ЭМ) неразрывно связана с серьезными и жесткими требованиями. Ави-

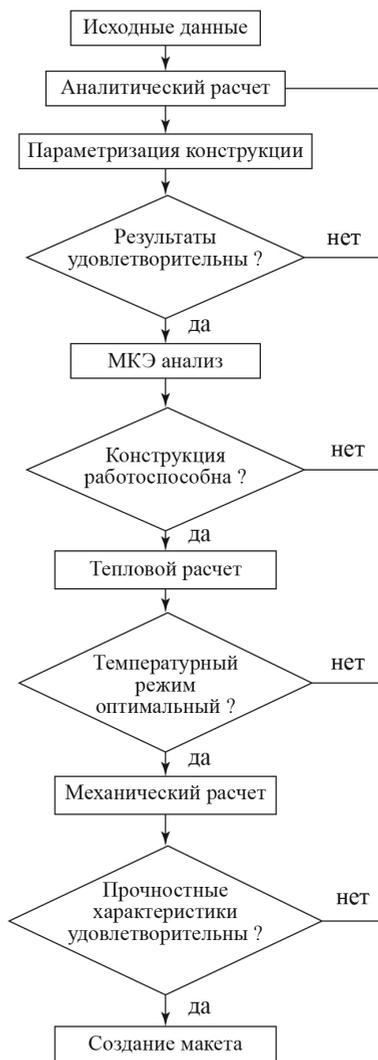
ационные ЭМ должны обладать высокой эффективностью, небольшими массогабаритными показателями и высокой надежностью. Выполнение этих требований невозможно без использования многодисциплинарного подхода к проектированию, поскольку необходимо иметь глубокое понимание не только электромагнитных характеристик ЭМ, но также тепловых и механических [4].

Широкий интерес в авиационной промышленности получили синхронные ЭМ с постоянными магнитами (ПМ) благодаря своей высокой эффективности и небольшим массогабаритным показателям [5]. В статье представлен весь процесс многодисциплинарного проектирования электропривода на основе синхронной ЭМ с ПМ для топливных и масляных насосов.

В общем виде процесс проектирования рассматриваемого электропривода можно представить в виде блок-схемы (рис. 1). В качестве электропривода выбрана синхронная ЭМ с наружным расположением ЭМ которая обеспечивает большую индукцию в зазоре по сравнению с ЭМ с внутренними ПМ. По аналитическим выкладкам определены размеры ЭМ (табл. 1). Далее проводится уточнение определенных размеров при помощи метода конечных элементов (МКЭ).

На рис. 2 представлен чертеж электропривода.

Электромагнитный численный расчет выполнен в пакете ANSYS Maxwell. На рис. 3 представлены зависимости фазных токов и крутящего момента от времени. Основные электромагнитные



**Рис. 1** Блок-схема проектирования электропривода

Таблица 1

**Геометрические размеры электропривода**

Параметр	Значение
Наружный диаметр магнитопровода статора, мм	162
Внутренний диаметр магнитопровода статора, мм	102
Наружный диаметр магнитопровода ротора, мм	81
Внутренний диаметр магнитопровода ротора, мм	65
Активная длина, мм	40

характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные результаты электромагнитного расчета**

Параметр	Значение
Скорость вращения, об/мин	12000
Выходная мощность, Вт	22140
Напряжение питания, В	425
Количество фаз	3
Ток фазы, А	52,6
Количество полюсов/пазов статора	10/12
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	8,4
Общие электромагнитные потери, Вт	891
КПД, %	95,6

По полученным результатам в электромагнитном расчете выходные показатели электропривода удовлетворяют ожидаемым.

Тепловой расчет проводится в программном пакете ANSYSMotorCAD. Для эффективного охлаждения статорная часть находится в

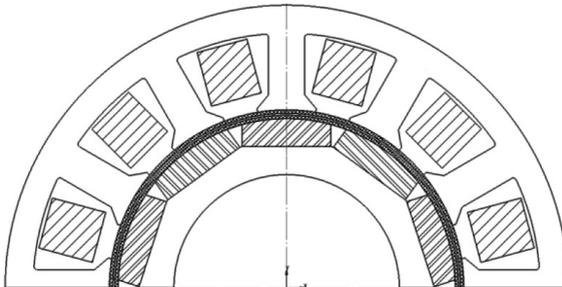
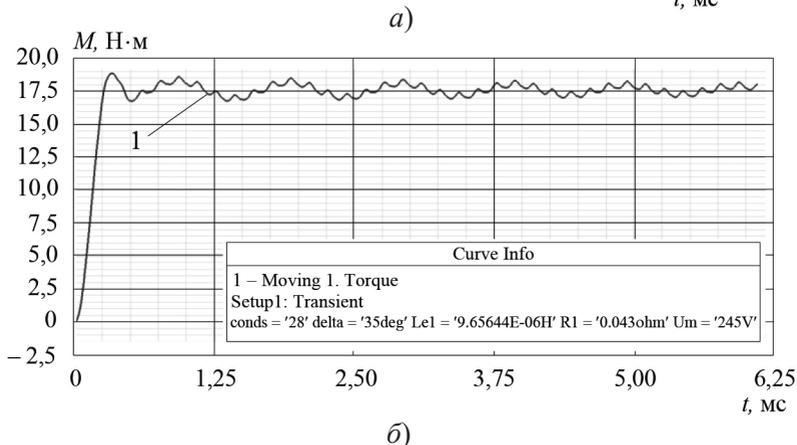
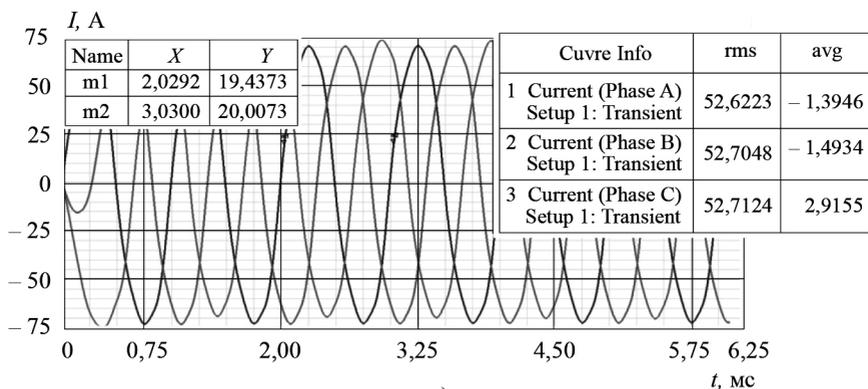


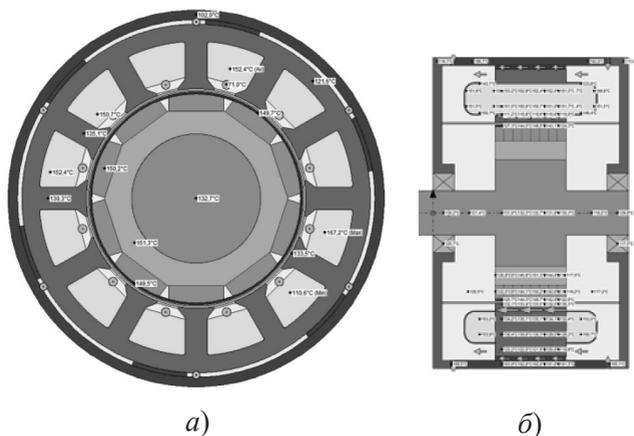
Рис. 2. Чертеж электропривода



**Рис. 3.** Зависимости фазных токов (а) и крутящего момента (б) от времени

рубашке охлаждения. Для изоляции статора от ротора используется стеклопластиковый стакан. Охлаждающая жидкость – масло. Масло протекает по каналам на внешней части статора, а также через паз статора с обмоткой. Модель теплового расчета представлена на рис. 4. Основные результаты теплового расчета представлены в табл. 3.

Как видно из результатов теплового расчета, максимальная температура в обмотках составляет  $167,2^{\circ}\text{C}$ , что меньше критической температуры для температуры обмотки  $220^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура ПМ –  $150,2^{\circ}\text{C}$ , что ниже критической температуры  $250^{\circ}\text{C}$ . Результаты теплового расчета свидетельствуют об оптимальности реализованной системы охлаждения и об отсутствии риска нарушений изоляции обмотки или размагничивания ПМ.



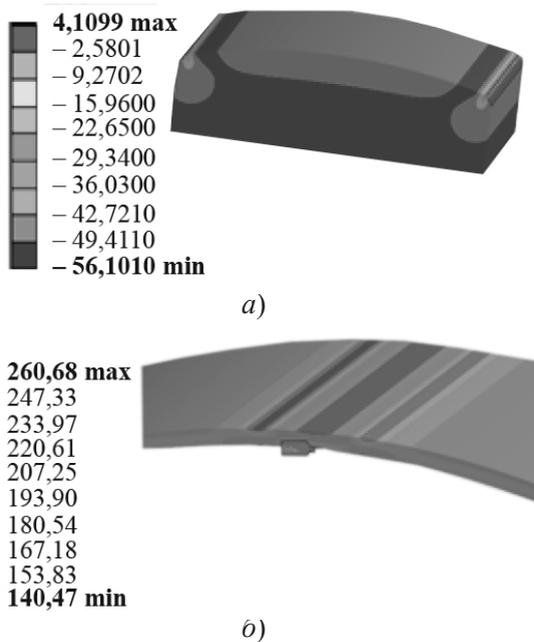
**Рис. 4.** Тепловой расчет электропривода: поперечный разрез (а); продольный разрез (б)

*Таблица 3*

**Результаты теплового расчета электропривода**

Параметр	Значение
Скорость вращения, об/мин	12000
Выходная мощность, Вт	22140
Расход хладагента по аксиальным каналам статора, л/мин	4
Расход хладагента по пазам, л/мин	4
Температура лобовых долей обмотки, °С	154
Температура пазовой части обмотки, °С	167,2
Температура зубца статора, °С	135,1
Температура спинки статора, °С	121,6
Температура постоянных магнитов, °С	150,2

Численный механический расчет выполняется для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции электропривода и определения критических скоростей вращения. Расчет проводится в программном комплексе ANSYS Mechanical. Рассчитываются коэффициенты запаса прочности для ПМ и бандажной оболочки. Результаты численного механического расчета представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Результаты прочностного расчета: напряжения растяжения сжатия для ПМ (а) и напряжения в бандажной оболочке (б)

Согласно полученным результатам, максимальные напряжения на растяжение для ПМ составляют 4,11 МПа (запас прочности 12,17) и 56,1 МПа на сжатие (запас прочности 15,18). Максимальные напряжения в бандажной оболочке составляют 260,7 МПа (запас прочности 3,41). Исследование критических скоростей вращения показало полное отсутствие критических режимов работы в ожидаемом рабочем диапазоне скоростей. Механический расчет показывает безопасность предложенной конструкции.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.*

#### Список литературы

1. **Newman R.** The more electric engine concept // SAE transactions. 2004. Pp. 1656 – 1661.
2. **Provost M.J.** The more electric aero-engine: A general overview from an engine manufacturer // 2002 International Conference on Power Electronics,

Machines and Drives (Conf. Publ. No. 487). IET, 2002.

3. **Morioka N. et al.** More electric engine architecture for aircraft engine application // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2011. Vol. 54631.

4. **Ganev E.D., Salam A.** Advanced Electric Drives for Aerospace Electric and Hybrid Propulsion / 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). IEEE, 2019.

5. **Barzkar A., Ghassemi M.** Electric power systems in more and all electric aircraft: A review // Ieee Access. 2020. Vol. 8.

## НАДЁЖНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Шувалов М.Ю.*

*Москва, ОАО «ВНИИКП»*

Под флуоресценцией понимают свечение материальных объектов под действием облучения внешним источником, как правило, относительно коротковолновой области спектра, чаще всего – ультрафиолетовой. Собственной, первичной флуоресценцией обладают многие природные объекты: ткани живых организмов (растений, животных, грибов), ряд минералов.

Флуоресценция широко применяется в различных видах человеческой деятельности, областях науки и техники, особенно широко – в медицине и биологии, где для исследования применяют специальные, промышленно производимые флуоресцирующие вещества – люминофоры.

Исследования, проводимые во ВНИИКП в течение многих лет, показывают, что качество и надёжность кабельных изделий во многом определяются факторами, процессами и явлениями, имеющими место в микроскопическом масштабе: технологическими микродефектами, особенностями микроморфологии, развитием микротрещин, локализованного термического старения, электрической и электрохимической деградации и т.д.

Многочисленные эксперименты подтвердили эффективность флуорес-

центной микроскопии и флуоресцентного спектрального анализа для углублённого лабораторного контроля качества кабелей среднего и высокого напряжения, диагностики состояния материалов и изделий после различных испытаний и после эксплуатации (главным образом применительно к отказавшим изделиям). Это подтверждается следующим конкретным опытом качественных и количественных исследований:

1. маслонаполненные кабели – определение степени термического старения и признаков разрядных процессов с помощью видимой и ультрафиолетовой люминесценции;

2. обнаружение и идентификация микродефектов в экструдированной изоляции;

3. водные триинги в сшитом полиэтилене и этиленпропиленовой резине. Обнаружение, качественная и количественная оценка степени деградации с применением микроспектрального люминесцентного анализа;

4. электрические триинги – диагностика раннего развития, в том числе в водных триингах;

5. количественный анализ накопления микротрещин;

6. изменение спектров флуоресценции при термостарении экструдированной изоляции как средство диагностики.

Автором показано, что изменение спектров флуоресценции кабельных диэлектриков (бумаги, сшитого полиэтилена) в процессе термического старения можно моделировать с помощью уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова или более общего уравнения, аналогичного уравнению массопереноса с химической реакцией, что в перспективе позволит составлять «спектральные портреты» стареющих материалов и более полно и точно выполнять диагностику и осуществлять прогноз состояния эксплуатируемых кабелей.

Микрофлуоресцентный анализ, таким образом, позволяет эффективно решать такие задачи, как выяснение причин отказа кабельной изделий, оценка степени старения, определение возможности дальнейшей эксплуатации изделий, обнаружение микродефектов и микроповреждений, их физической природы и количественных характеристик.

# МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ ГРАНАТОВ МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

*Сыров А.А., Бержанский В.Н., Томилин С.В.*

*КФУ им. В.И. Вернадского*

Нанотехнологии имеют широкие перспективы в разнообразных практических областях: создания наиболее прочных и облегченных конструкционных материалов, сокращения времени обеспечения системы кровообращения наноструктурированными лекарствами препаратами, повышения объема магнитных носителей информации, а также разработки триггеров для суперкомпьютеров [1, 2].

Главной задачей микроэлектроники является более точное изготовление основных частей вычислительных систем, в том числе и микроструктур, на основе которых создаются устройства функциональной микроэлектроники.

Для экспериментального получения информации о кристаллической структуре, элементном составе, а также механических, электрических, оптических и магнитных характеристиках микроструктурированных и наноструктурированных материалов используют различные способы диагностирования и анализа, в том числе технологии преобразования поверхности.

Метод ионного травления [3] дает возможность выявить поверхностную структуру, сформировать заданный рельеф с весьма высоким пространственным разрешением, очистить поверхность от всевозможных примесей.

В статье выполнены исследования влияния ионного травления на структурные и магнитные свойства эпитаксиальных плёнок ферритов-гранатов.

Были проведены исследования четырех пленок ферритов-гранатов:  $(\text{BiLu})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (толщиной  $h = 0,16$  мкм),  $(\text{BiY})_3(\text{AlGaFe})_5\text{O}_{12}$  (толщиной  $h = 7,6$  мкм),  $\text{Y}_3(\text{LnFe})_5\text{O}_{12}$  (толщиной  $h = 2,4$  мкм),  $(\text{YLu})_3(\text{InScFe})_5\text{O}_{12}$  (толщиной  $h = 0,115$  мкм), выращенных на монокристаллических подложках галлий-гадолиниевого граната.

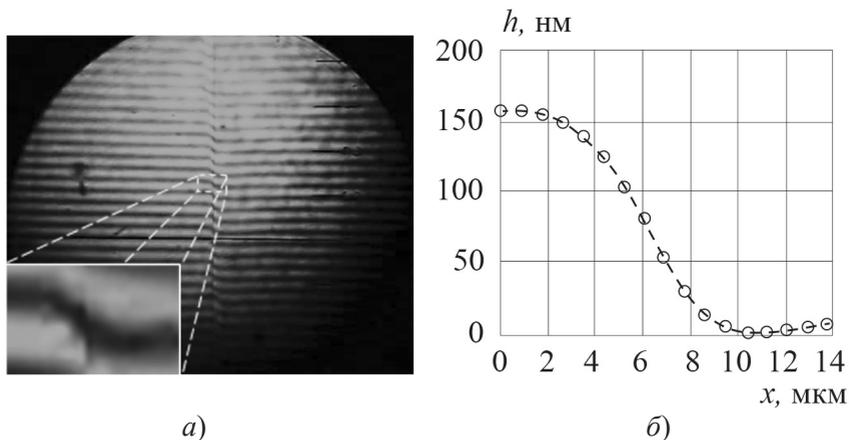
На начальном этапе исследования обрабатывалась технология формирования гладкого профиля путем непосредственного наложения маски из немагнитного диэлектрика (гадолиний-галлиевый гранат толщиной 500 мкм) на поверхность пленки  $(\text{BiLu})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , (толщиной  $h = 0,16$  мкм).

Одним из факторов, ограничивающих скорость и эффективность динамического перемагничивания эпитаксиальных плёнок, является образование краевых доменов на боковых гранях плёнки. Для снижения влияния краевых доменов профиль края плёнки стараются сделать максимально плавным.

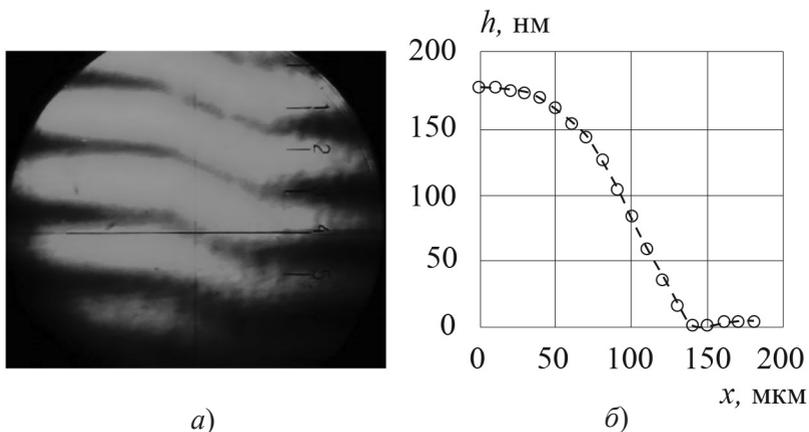
В эксперименте при ионном травлении на поверхность плёнки накладывается маска из немагнитного диэлектрика. Ионы аргона при взаимодействии с поверхностью диэлектрика создают наведённый положительный заряд. Краевые эффекты на границе маски (в том числе и полевое взаимодействие ионов  $\text{Ar}^+$  с наведённым поверхностным зарядом) приводят к искривлению ионного потока и формированию градиента скорости травления. Таким образом, вблизи границы маски формируется край плёнки с гладким профилем.

Рассмотрены два варианта – когда маска находится непосредственно на поверхности (рис. 1) и приподнята над ней (рис. 2).

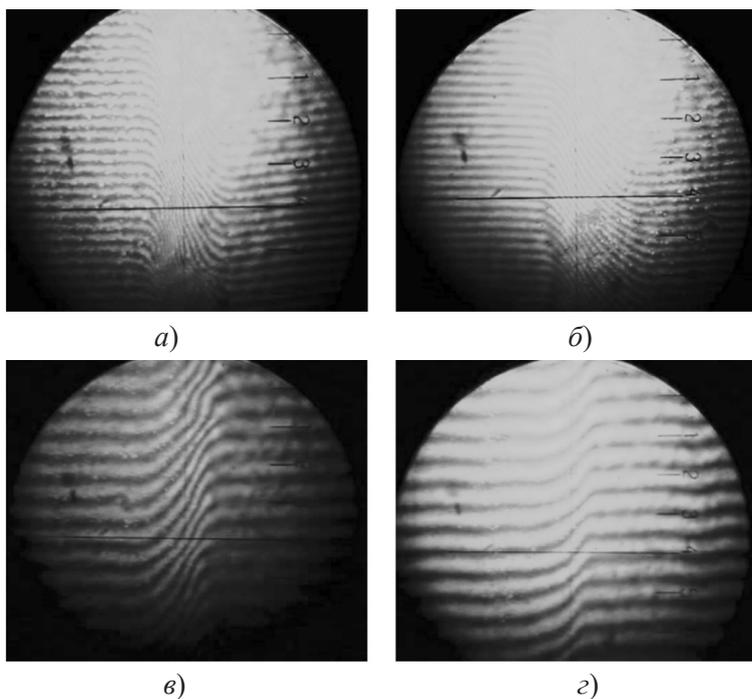
Анализ реального профиля экспериментально определялся с по-



**Рис. 1.** Гладкий профиль края плёнки после травления (маска на поверхности плёнки): снимок интерференционной картины (а); форма гладкого профиля края плёнки (б)



**Рис. 2.** Гладкий профиль края плёнки после травления (маска над поверхностью плёнки): интерференционная картина (а); форма гладкого профиля края плёнки (б)



**Рис. 3.** Интерференционные картины на границах четырех областей (а – г) травления методом маскирования над поверхностью с зазором 300 мкм (монокроматическое излучение  $\lambda = 532$  нм)

мощью микроинтерферометра. При расшифровке снимков видно, что для случая, когда маска находится непосредственно на поверхности пленки, ширина профиля 10 мкм, а когда маска приподнята над поверхностью на 300 мкм был получен гораздо более широкий профиль порядка 140 мкм.

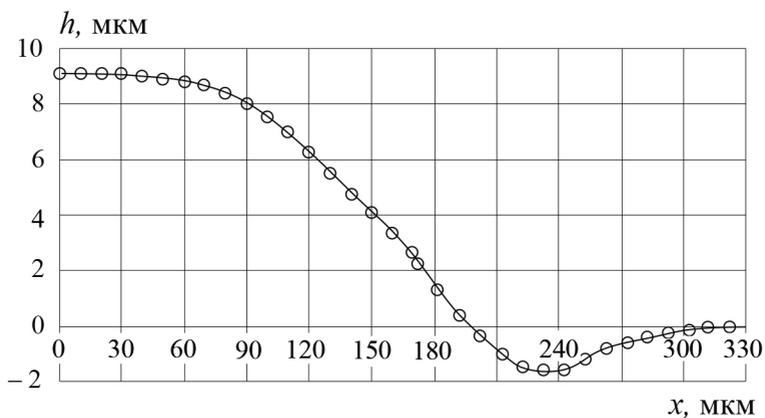
Далее проводились исследования путем ступенчатого послойного ионного травления методом маскирования над поверхностью. После каждого цикла травления маска четыре раза сдвигалась по отношению к краю пленки на некоторое расстояние, что позволило получить ступенчатую структуру из гладких профилей.

На следующем этапе исследования маска накладывалась перпендикулярно к предыдущим границам травления над поверхностью, что позволило получить единый гладкий профиль края травления для всех ранее сформированных ступенек, шириной 200 мкм, при глубине травления в 9 мкм.

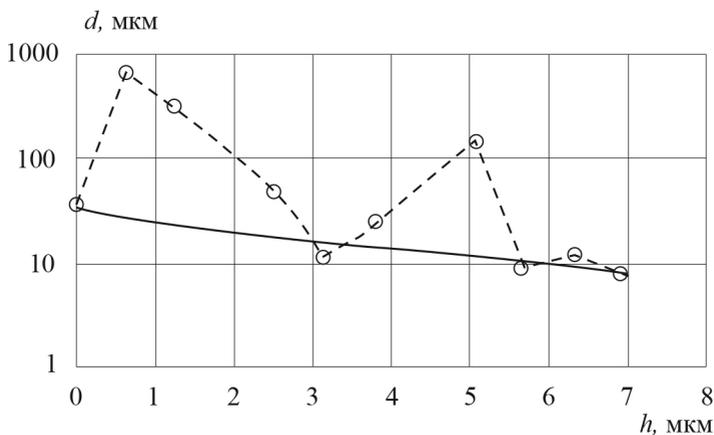
Для анализа изменения периода доменной структуры образца при травлении различной части толщины плёнки использовался поляризационный микроскоп.

По результатам травления построена экспериментальная зависимость (рис. 5), на которой можно наблюдать несколько выраженных пиков, связанных с наличием слоев с иными свойствами.

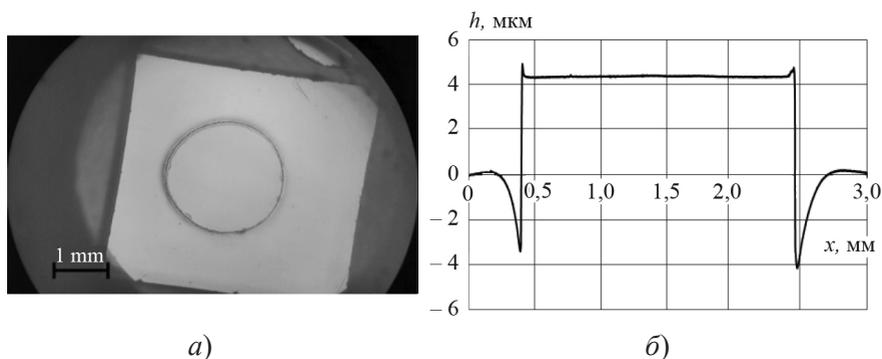
Ионное травление также позволяет формировать структуры поверхности пленки «сложной» формы. Для отработки технологии получения



**Рис. 4.** Профиль края пленки при наложении маски над поверхностью плёнки с зазором 500 мкм



**Рис. 5.** Экспериментальная зависимость периода доменной структуры от толщины сравненного слоя



**Рис. 6.** Образец с гладким 3D-профилем круглой формы (пленка  $Y_3(LnFe)_5O_{12}$ ,  $h = 2,4$  мкм): фото структуры с круглым профилем (а); профиль сформированной поверхности (б)

использовалась подложка гадолиний-галлиевого граната в форме диска, которая располагалась на пленке  $Y_3(LnFe)_5O_{12}$ . В результате обработки был получен гладкий профиль круглой формы и при помощи профилометра снят профиль сформированной поверхности (рис. 6).

### Выводы

1. Анализ внутренней структуры магнитных эпитаксиальных плёнок феррит-гранатов методом послойного ионного травления показал, что в структуре плёнки наблюдаются различные ферромагнитные резонансные состояния, связанные с переходными слоями на интерфейсе

плёнки и подложки и на поверхности плёнки.

2. При изменении толщины плёнки в процессе послойного травления возможно разделение резонансного сигнала на несколько сигналов, обусловленных резонансом от различных слоёв.

### **Список литературы**

1. **Балабанов В.** Нанотехнологии. Наука будущего (Открытия, которые потрясли мир). М.: Эксмо, 2009.
2. **Пул Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005.
3. **Данилин Б.С., Киреев В.Ю.** Ионное травление микроструктур. М.: Сов. радио, 1979.

## **МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

***Денисов В.Н., Курилин С.П.***

*Смоленск, Смоленский филиал МЭИ*

При моделировании работы линейных асинхронных двигателей (ЛАД) используют математические модели с бесконечно длинными или «короткими» индуктором и вторичными элементами (ВЭ). При этом в каждом конкретном случае необходимо технико-экономическое обоснование применения ЛАД, которое выполняется на основе оценки основных технических характеристик устройства, полученных путём математического моделирования. Необходимость использования той или иной модели диктуется конструктивным исполнением ЛАД. Кроме учета геометрических размеров индуктора и ВЭ требуется учитывать переменность характеристик объекта по длине, управление полем для компенсации краевых эффектов, потребность представления тока индуктора в виде набора дискретно расположенных проводников, существование ЛАД с разрывным ВЭ [1, 2].

В связи с несерийным производством ЛАД и отсутствием консолидированной базы их технических характеристик, предварительные оценки этих характеристик могут быть выполнены на математических моделях, ориентированных на проектировочные задачи.

Среди моделей проектировочного направления выделяется модель [3], построенная на детализированных схемах замещения фрагментов структуры ЛАД.

Задача настоящего исследования состоит в представлении аналитической модели проектировочного направления и методов ее решения, предназначенных для предварительной оценки основных технических характеристик ЛАД.

Для решения сформулированных задач воспользуемся математической моделью главного магнитного поля ЛАД с переменными коэффициентами в виде линейного дифференциального уравнения с нулевыми краевыми условиями на границе области затухания электромагнитного поля:

$$\begin{cases} A(x) - \beta^2 A - \mu(x) \cdot \sigma(x) \frac{1}{k_1} j\omega - \mu(x) \cdot \sigma(x) \cdot \vartheta \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot A_x = -\frac{\mu(x)}{\delta} \cdot j_1 \\ A(0) = 0, \quad A(1 - 2\varepsilon) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – длина зоны затухания электромагнитного поля;  $A(x)$  – искомая функция векторного магнитного потенциала (ВМП);  $\omega$  – частота возбуждающего тока;  $j_1(x) = J_0 e^{-j2p\pi x}$ ,  $J_0 / \delta$  – амплитуда тока индуктора в о.е.,  $p$  – число пар полюсов ЛАД;  $\beta^2$ ,  $\mu(x)$ ,  $\sigma(x)$  – функции, учитывающие размеры индуктора, ВЭ и их взаимное расположение;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты подобия;  $\vartheta$  – скорость ВЭ в о.е.

Точное аналитическое решение уравнения (1), полученное методом интегрального преобразования Фурье, ориентировано на проектирование ЛАД с длинным ВЭ. Решение для  $2p$ -полюсной волны возбуждающего тока

$$j_1(x) = J_0 e^{-j2p\pi x}$$

получено в виде

$$A = \frac{j_1}{2\lambda\delta} e^{\frac{Vx}{2}} \left( e^{-\lambda x} \varphi(x) + e^{\lambda x} \psi(x) \right), \quad (2)$$

где

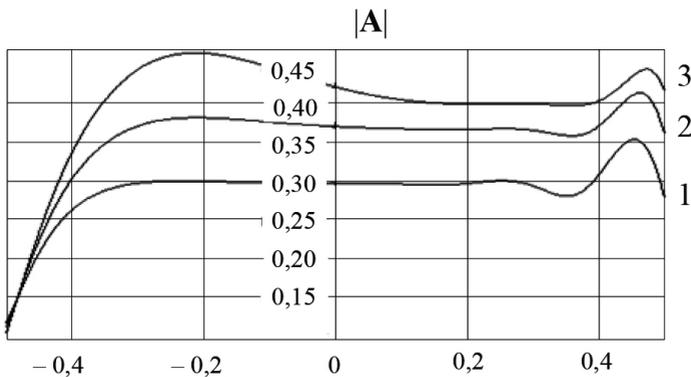
$$\lambda = \sqrt{\beta^2 + \frac{V^2}{4} + j\Omega}, \quad V = \frac{k_2}{k_1} \sigma v, \quad \Omega = \frac{\sigma}{k_1},$$

$$\varphi(x) = \frac{e^{(\lambda - V^2 - j2p\pi)x} - e^{-(\lambda - V^2 - j2p\pi)\frac{1}{2}}}{\lambda - V^2 - j2p\pi};$$

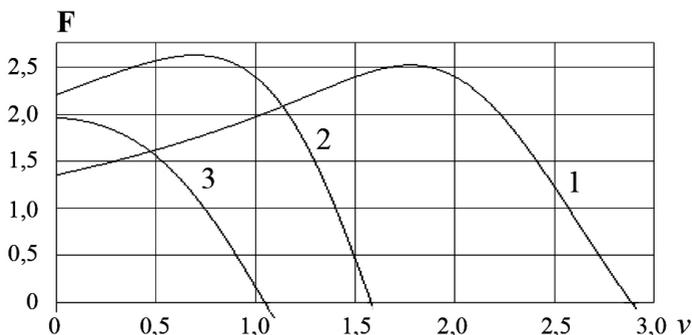
$$\psi(x) = \frac{-e^{(\lambda + V^2 + j2p\pi)x} + e^{-(\lambda + V^2 + j2p\pi)\frac{1}{2}}}{\lambda - V^2 - j2p\pi}.$$

На рис. 1 приведены огибающие кривые векторного магнитного потенциала, рассчитанные по выражению (2) для различных скоростей ВЭ, а на рис. 2 – механические характеристики ЛАД в различном исполнении. Наряду с базовым шестиполосным исполнением устройства анализировались также двухполосное и четырёхполосное исполнения ЛАД, которые могут быть реализованы, например, в составе грузоподъемного оборудования. При этом все прочие технические данные модифицированного исполнения устройства сохранялись такими же, как в базовом варианте. Результаты анализа отражает рис. 2. Как следует из рис. 1 и 2, интенсивность электромагнитного поля с ростом скорости увеличивается, а сила снижается. Это свидетельствует о том, что спроектированный двигатель обладает наибольшей энергетической и механической активностью при относительно невысоких скоростях, порядка 2 – 3 м/с, где и рекомендуется его эксплуатировать.

При построении приближенного аналитического решения для задач с ЛАД ограниченной длины применяется метод Бубнова-Галеркина. Решение ищется в виде разложения по функциям, удовлетворяю-



**Рис. 1.** Огибающие векторного магнитного потенциала ЛАД с длинным ВЭ:  $v = 0$  (1);  $v = 0,5$  (2);  $v = 1$  (3)



**Рис. 2.** Механические характеристики вариантов исполнения ЛАД с длинным ВЭ:  $2p = 2$  (1);  $2p = 4$  (2);  $2p = 6$  (3)

щим поставленным в (1) краевым условиям:

$$\tilde{A}(x) = \sum_{n=1}^N a_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{1+2\varepsilon}\right). \quad (3)$$

Рассматриваемое приближенное решение (3) удовлетворяет краевым условиям в (1), но дифференциальному уравнению в общем случае не удовлетворяет.

Формируем функцию невязки решения

$$\begin{aligned} n v = \tilde{A}_{xx} - \beta^2 \tilde{A} - \mu(x) \cdot \sigma(x) \frac{1}{k_1} j \omega \tilde{A} - \\ - \mu(x) \cdot \sigma(x) \cdot \vartheta \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot \tilde{A} + \frac{\mu(x)}{\delta} \cdot j_1, \end{aligned} \quad (4)$$

то есть в виде функции с неизвестными коэффициентами  $a_n$ . Коэффициенты определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left( n v(x), \sin\left(\frac{n\pi x}{1+2\varepsilon}\right) \right) = 0, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

где принято, что  $(n, v) = \int_0^{1+2\varepsilon} u \cdot v dx$  – скалярное произведение функций

на отрезке  $[0, 1+2\varepsilon]$ .

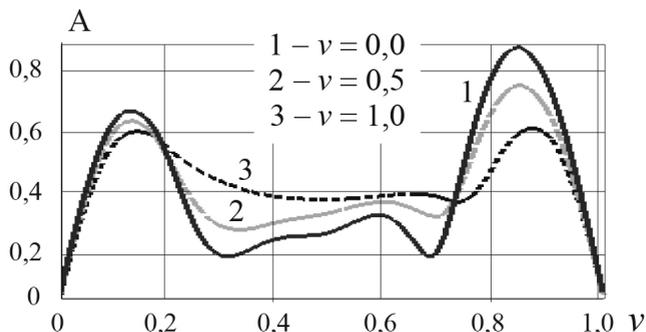
Моделирование ЛАД с коротким ВЭ проводилось по выражениям (3), (4) для значений  $\varepsilon = 0,01$ ,  $N = 22$ ,  $\beta^2 = 0,648$ ,  $\mu(x) \cdot \sigma(x) 1/k_1 \omega = 328,57 \cdot (H(x - x_{л1}) - H(x - x_{л2}))$ ,  $\mu(x) \cdot \sigma(x) \cdot \vartheta \cdot k_2 / k_1 = 17,32 \cdot \vartheta \cdot (H(x - x_{л1}) - H(x - x_{л2}))$ ,  $\mu(x) / \delta \cdot j_1 = 144 \cdot e^{-i6\pi(x-0,1)} \cdot (H(x - 0,01) - H(x - 1,01))$ . При этом принято, что  $H(x)$  – функция Хевисайда;  $x_{л1}$ ,  $x_{л2}$  – координаты индуктора.

Рассматривался шестиполосный ЛАД; ВЭ располагался в центре индуктора.

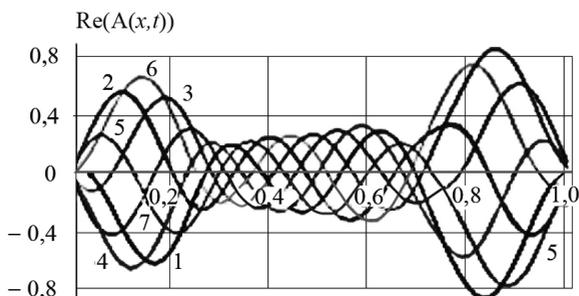
Результаты математического моделирования ВМП приведены на рис. 3 для различных значений безразмерной скорости  $\vartheta$  вторичного элемента. Длина ВЭ равна 0,5 о.е., ВМП рассчитывался при нахождении ВЭ в центре индуктора.

В зоне ВЭ огибающая ВМП, как и в случае бесконечно длинных индуктора и ВЭ, с ростом скорости показывает рост амплитудных значений, в зоне отсутствия ВЭ картина огибающей противоположна. Этот факт отражает увеличение конвективной составляющей ВМП в ЛАД с коротким ВЭ. Огибающая ВМП сформирована на основе расчета мгновенных составляющих, представленных графиками действительной части ВМП в разные моменты времени при  $\nu = 0,5$  (рис. 4).

Обратная составляющая пульсирующего поля создает паразитные тормозные силы, при этом возникают неравномерное распределение тока в фазах обмотки статора, искажение распределения магнитного поля в воздушном зазоре и, как следствие, дополнительные потери



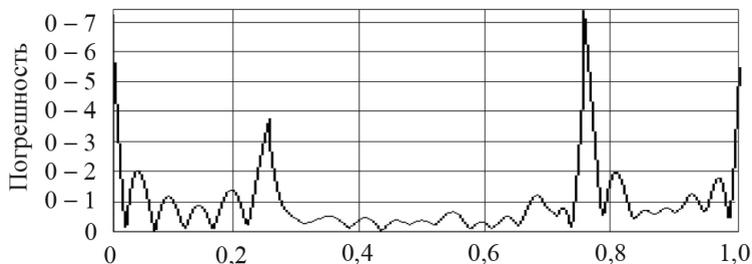
**Рис. 3.** Распределение огибающей ВМП по длине ЛАД при разных скоростях ВЭ



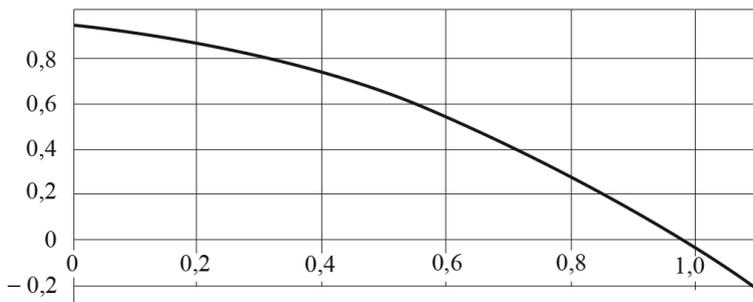
1 –  $t = 0$ , 2 –  $t = 0,0005$  о.е., 3 –  $t = 0,001$ , 4 –  $t = 0,0015$ ,  
5 –  $t = 0,0020$ , 6 –  $t = 0,0025$ , 7 –  $t = 0,0030$

**Рис. 4.** Графики ВМП в разные моменты времени мощности. Относительная погрешность найденного решения, приведенная (рис. 5), в целом не превышает 20 %, что говорит о достоверности результатов.

Полученные аналитические выражения для ВМП позволяют построить механическую характеристику ЛАД. При этом, в отличие от



**Рис. 5.** График относительной погрешности решения для ВМП



**Рис. 6.** Механическая характеристика ЛАД

модели с бесконечно длинными индуктором и ВЭ, в рассматриваемом случае при скорости равной синхронной скорости  $\vartheta = 1$ , может возникать генераторный режим. Соответствующая механическая характеристика представлена на рис. 6.

### **Выводы**

Предложенная математическая модель позволяет находить приближенное аналитическое решение поставленной задачи для случаев с бесконечно длинным и коротким индуктором и ВЭ.

Методы решения позволяют исследовать проектировочные характеристики ЛАД и контролировать относительную погрешность в ходе нахождения решения.

Модель допускает исследования ЛАД с длинным и коротким индуктором и (или) вторичным элементом, причем с кусочно-непрерывными по длине характеристиками элементов ЛАД.

Модель и метод позволяют исследовать механическую и другие характеристики ЛАД и выполнять параметрическое исследование объекта.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00283*

### **Список литературы**

1. Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э., Швыдкий Е.Л., Смольянов И.А. Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения // Электротехника. 2018. № 4.
2. Иванушкин В.А., Сарапулов Ф.Н., Кожеуров В.Н., Исаков Д.В. Структурное моделирование электротехнологических систем и механизмов. Н-Тагил: НТИ(ф) УГТУ-УПИ, 2007.
3. Sarapulov F.N., Frizen V.E., Shvydkiy E.L., Smol'yanov I.A. Mathematical modeling of a linear-induction motor based on detailed equivalent circuits // Russian Electrical Engineering. 2018. Vol. 89. № 4.

# ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ МЕТОДОМ ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

*Бычков С.А., Миронов С.Е., Саранулов Ф.Н., Саранулов С.Ф.,  
Смолянов И.А., Тарасов Ф.Е., Швыдкий Е.Л.*

*Екатеринбург, Уральский Федеральный Университет*

Статья посвящена расчету характеристик индукционной тигельной печи (ИТП) упрощенными традиционными методами расчета индукционных печей, применяемыми в инженерной практике [1, 2], расчету путем формирования детализированной схемы замещения магнитной цепи [3], и численными методами на основе пакета COMSOLMultiphysics. Выполнено сравнение результатов расчета различными методами.

Объект исследования – индукционная тигельная печь емкостью 0,5 кг. Высота тигля 0,147 м, диаметр по средней линии 0,083 м, толщина футеровки 0,0085 м. Высота индуктора 0,085 м, внутренний диаметр индуктора 0,1 м, высота 0,085 м. Индуктор печи состоит из  $Q_i = 8$  витков, изготовленных из отожженной медной трубки диаметром  $d = 8$  мм с толщиной стенки 1 мм. Эскиз сечения витка индуктора показан на рис. 1. При расчете характеристик печи в пакете Mathcad сечение электропровода индуктора представляется в виде прямоугольника (рис. 1, справа) длиной  $B_p$  и толщиной, равной усредненной глубине проникновения переменного тока в провод.

Математическая модель на основе ДМСЗ [2] рассматриваемой печи реализована в пакете Mathcad для цилиндрической системы координат.

Задаются размеры элементов печи, шаги разбиения объекта по координатам, свойства материалов, схема соединения и ток питания обмотки индуктора. Один слой детализированной магнитной схемы замещения (один провод по толщине слоя с разбиением на 25 участков по радиусу ИТП) показан на рис. 2. Ток витка обмотки индуктора протекает по полуму проводу кольцевого паза перпендикулярно плоскости чертежа (например, «от нас») и возвращается («к нам») в расположенной справа от оси части провода. Магнитный поток  $\Phi$  охватывает указанный ток индуктора, создавая ЭДС в рассматриваемом витке.

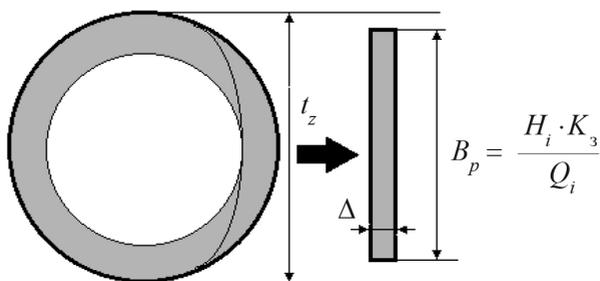


Рис. 1. Преобразование провода

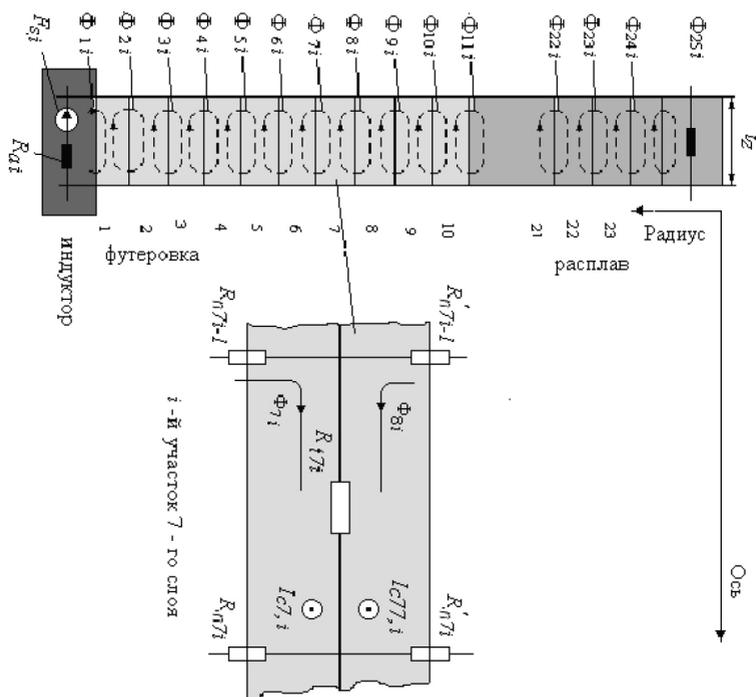
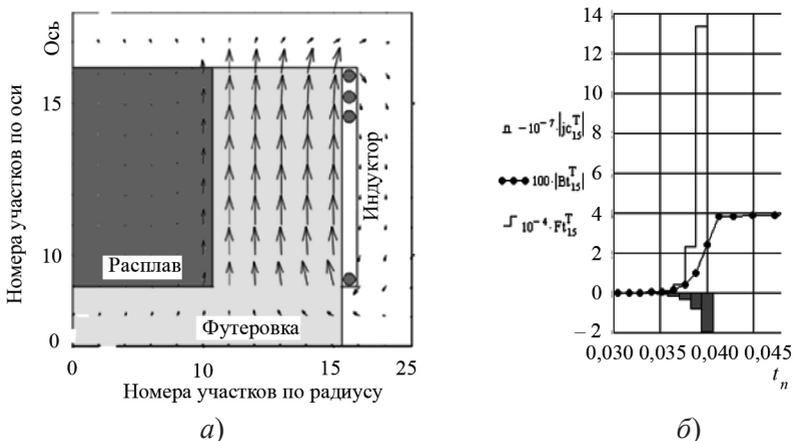


Рис. 2. 25-слойный участок детализированной магнитной схемы замещения ИТП с жидкометаллической нагрузкой

На рис. 3,а показано распределение магнитной индукции в сечении ИТП. Как видно, магнитное поле в расплаве вытесняется в периферийные слои жидкого металла, что объясняется высокой частотой питающего тока. Рис. 3,б демонстрирует распределения по радиусу индукции и плотности тока, а также радиального усилия в расплаве. Следует от-

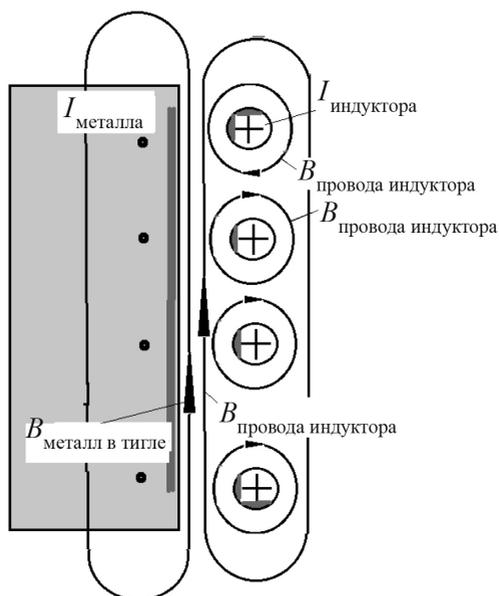


**Рис. 3.** Векторное поле магнитной индукции (а) и распределения плотности тока, удельного усилия и индукции по радиусу (б)

метить, что глубина проникновения при высокой частоте питающего тока может оказаться меньше шага разбиения при построении детализированной магнитной схемы замещения. Это приведет к некоторому занижению расчетных значений индуцированной плотности тока в боковых клетках загрузки.

Эффект близости токопроводов проявляется в виде вытеснения переменного тока в их сечениях (рис. 4, показано рядом со стрелками направлений токов):

Токи в витках обмотки и индуцированные токи в загрузке находятся практически в противофазе (показано точками в загрузке и крестиками в проводе), при этом токи вытесняются в ближайшие друг к другу области – к поверхностям провода и загрузки (поверхностный эффект с соответствующей глубиной проникновения), токи в фазе рассматриваемых проводов (например, двух верхних проводов обмотки индуктора) вытесняются в дальние области сечения (показано в верхнем проводе). В соседнем с ним проводе (например, втором сверху) ток не вытесняется в нижнюю область сечения, поскольку этому «мешает» третий сверху провод с таким же током и т.д. до самого нижнего провода, в котором ток вытесняется в нижнюю область сечения (симметрично верхнему проводу). Практически индукция между проводами составляет весьма малую величину (магнитная силовая линия замыкается вокруг всей обмотки индуктора – большая замкнутая линия со стрелкой).



**Рис. 4.** Магнитные силовые линии и токов в ИТП

Кроме этого, были проведены расчеты в пакете COMSOL Multiphysics 5.3 с заданием реальной геометрии сечения провода, а также с помощью типового формуляра расчета характеристик индукционной тигельной печи [1]. На рис. 5 приведены картины распределения тока в сечениях верхнего и среднего витков обмотки печи, которые подтверждают сведения, изложенные выше.



Средний виток

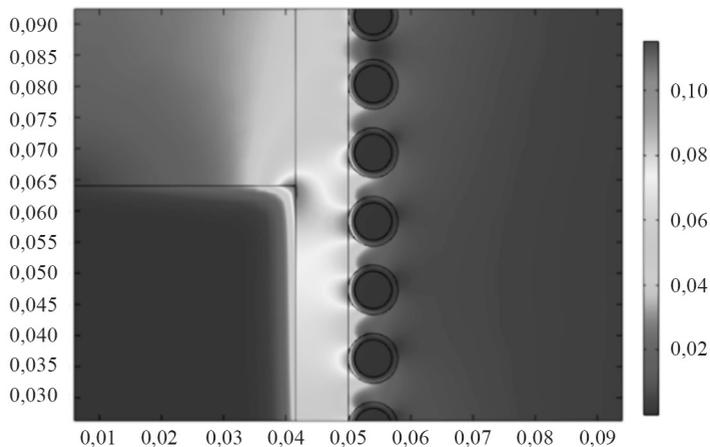


Крайний верхний виток

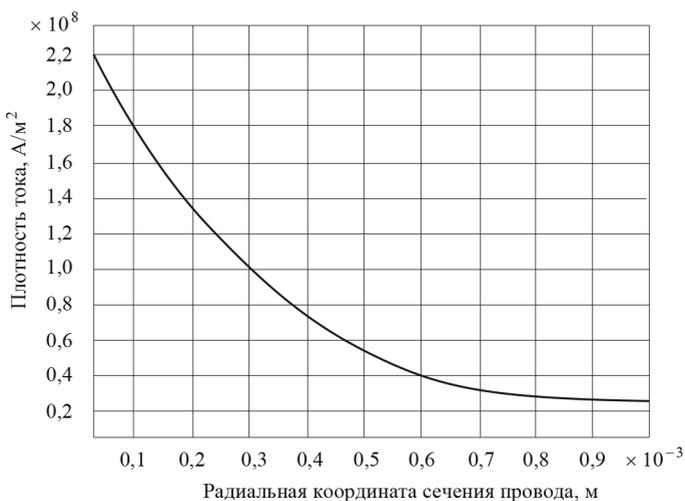
**Рис. 5.** Распределение плотности тока в сечениях витков обмотки печи

На рис. 6 показана картина распределения магнитной индукции в продольном сечении тигля и вне его (рядом приведена шкала соответствия цвета и значения магнитной индукции).

Как видно, максимальная индукция достигает значения 0,11 Тл в сечении стенки тигля у поверхности расплава и постепенно уменьшается при приближении к дну тигля.



**Рис. 6.** Распределение индукции в сечении тигля



**Рис. 7.** Распределение плотности тока по радиусу сечения провода индуктора

На рис. 7 показано распределение плотности тока по сечению стенки провода. Можно видеть, что у поверхности водоохлаждаемого провода плотность тока достигает значения  $2,2 \cdot 08 \text{ А/м}^2$ . По мере удаления от поверхности она резко и существенно снижается и на расстоянии 1 мм от поверхности уменьшается в 10 раз. Значительные тепловые нагрузки на провод снимаются за счет применения водоохлаждаемой обмотки индуктора.

В таблице приведены результаты расчета характеристик ИТП методами ДМСЗ и классическим методом в соответствии с [1].

**Таблица сравнения характеристик**

Параметр индуктора	Метод ДМСЗ	Упрощенный метод [1]
Сопrotивление индуктора, Ом	$0,04 + j0,456$	$0,043 + j0,438$
Напряжение индуктора, В	$12,074 + j 136,826$	$12,959 + j 131,378$
Ток обмотки индуктора, А	300	300
Мощность индуктора с загрузкой, ВА	$3622 + j41050$	$3888 + j39411$
Сопrotивление обмотки индуктора, Ом	0,013	0,010
Коэффициент мощности, о.е.	0,088	0,098

### **Выводы**

1. Метод детализированных схем замещения позволяет с достаточной степенью точности и малыми затратами времени рассчитать параметры индукционной тигельной печи в основных режимах работы.

2. Метода конечных элементов дает возможность уточнить особенности распределения токов и магнитного поля в проводах обмотки индуктора. При этом требуются существенно большие затраты времени.

*В исследованиях принимали участие бакалавры Уральского федерального университета Бардаков В.В. и Парфенов Н.В.*

### **Список литературы**

1. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. М.: Энергия, 1975.

2. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи. М.: Госэнергоиздат, 1960.

3. **Лузгин В.И., Сарапулов С.Ф., Сарапулов Ф.Н., Сокунов Б.А., Томашевский Д.Н., Фризен В.Э., Черных И.В., Шипицын В.В.** Плавильные комплексы на основе ИТП и их математическое моделирование. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.

## МЕТОД ПОИСКА ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Крюков К.В., Родькин Н.С., Церковский Ю.Б.,  
Шорсткин И.П., Баранов Н.Н., Соломатин А.В.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Использование возобновляемых источников энергии приобретает все большую популярность из-за растущего потребления ископаемого топлива, что приводит к ухудшению состояния окружающей среды.

Современные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) преобразуют один из наиболее доступных природных источников энергии – солнечную энергию. Постоянное совершенствование этих систем снижает их стоимость, повышает эффективность и стабильность, а также снижает вредное воздействие на окружающую среду. Во многих системах с фотоэлектрическими элементами (ФЭ) основной задачей является отслеживание точки максимальной мощности (ТММ), поскольку работа солнечной батареи в ТММ является наиболее предпочтительной как с энергетической точки зрения, так и с точки зрения её срока службы.

Среди обычных способов поиска ТММ наиболее известным является метод наблюдения и возмущения (НиВ) из-за его простоты и несложной реализации. Однако этот метод имеет два основных недостатка: непрерывные колебания, которые происходят вокруг ТММ, кроме того, при использовании метода НиВ часто теряется направление отслеживания ТММ, когда освещённость солнечной батареи (СБ) меня-

ется с большой скоростью. Это приводит к снижению эффективности получения энергии от СБ.

Предлагается улучшенный метод поиска ТММ, использующий повышающий преобразователь в качестве согласующего устройства между СБ и нагрузкой. Метод управления основан на перемещении по вольт-амперной характеристике СБ, с адаптивным изменением коэффициента заполнения. Для уменьшения колебаний вокруг точки максимальной мощности и увеличения скорости её поиска предлагается менять коэффициент заполнения в зависимости от расстояния до ТММ. Если рабочая точка находится далеко, то размер шага изменения коэффициента заполнения увеличивается, позволяя получить более высокую скорость поиска локальной ТММ. В момент поиска локальной точки максимальной мощности предлагаемый метод отслеживает перемещение рабочей точки по ВАХ СБ и меняет направление ее перемещения для приближения к ТММ. На рис. 1 приведена вольт-ваттная характеристика фотоэлектрического модуля, которая показывает траекторию рабочей точки  $X_n$ , где  $n$  – количество шагов, выполняемых при изменении освещённости.

При инициализации алгоритма устанавливается максимальное значение приращения коэффициента заполнения  $\Delta d_{max}$ , что позволяет быстро привести рабочую точку СБ к ТММ. После того, как рабочая точка проходит через ТММ, приращение меняет свой знак, и его значе-

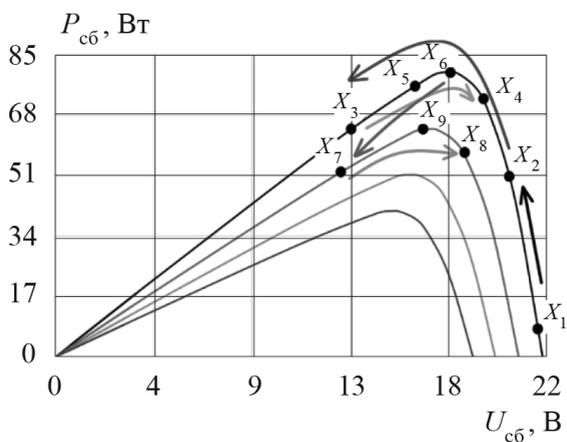


Рис. 1. Траектория рабочей точки во время поиска ТММ

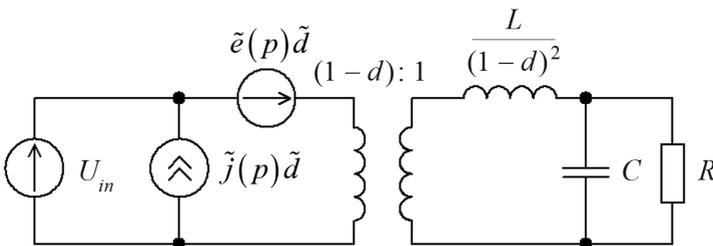
ние уменьшается до значения  $\Delta d_1$ . Затем рабочая точка модуля перемещается в противоположном направлении, но с меньшей скоростью. При каждом переходе через точку максимальной мощности знак приращения снова меняется, и его значение уменьшается до значения  $\Delta d_2$ ; так происходит до тех пор, пока оно не станет равным  $\Delta d_{\min}$ . В этом случае  $\Delta d_{\min}$  выбирается из условия минимизации колебаний около ТММ.

Изменение интенсивности солнечного излучения отслеживается по производной мощности по напряжению (отношение приращения мощности к приращению напряжения). Если производная превышает предельное значение для указанного периода поиска точки максимальной мощности, приращение коэффициента заполнения увеличивается, в зависимости от значения производной: чем больше производная, тем больше значение приращения.

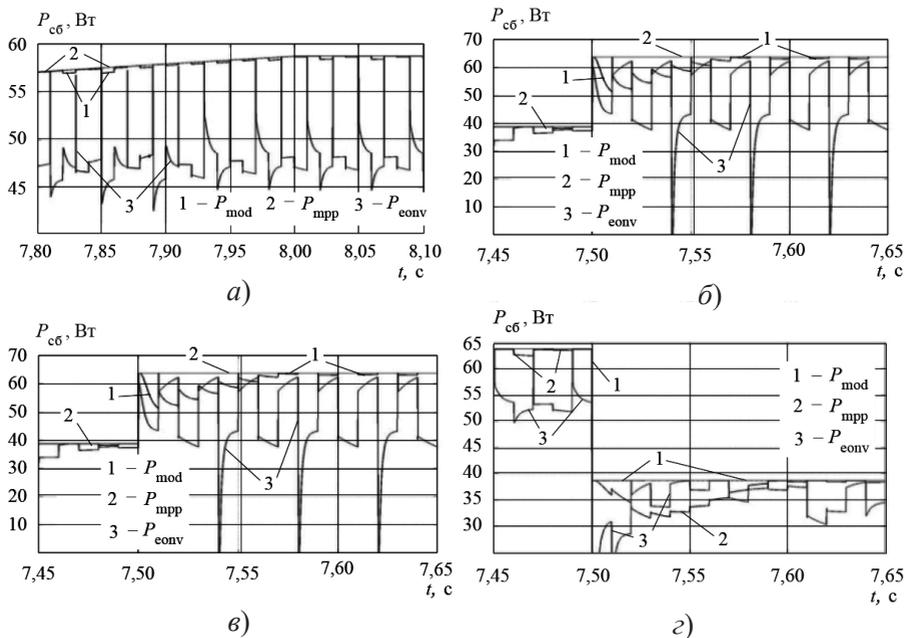
Повышающий преобразователь рассматривается как согласующее устройство между фотоэлектрическим модулем и нагрузкой. Линеаризованная модель силовой части повышающего преобразователя позволяет определить период дискретизации при измерении тока и напряжения ФЭП, а также определить длительность переходного процесса для ступенчатого изменения коэффициента заполнения системы управления преобразователем до достижения ТММ (рис. 2).

На рис. 3 представлены диаграммы мощности при плавном и быстром изменении освещенности СБ с 500 до 800 Вт/м<sup>2</sup> и с 800 до 500 Вт/м<sup>2</sup>. Стандартный алгоритм НиВ показывает низкую эффективность как при поиске ТММ, так и при нахождении около неё со значительными колебаниями.

Общая эффективность предлагаемого алгоритма больше чем у стан-



**Рис. 2.** Линеаризованная модель силовой части повышающего преобразователя



**Рис. 3.** Результаты моделирования

дартного алгоритма. Это свидетельствует о том, что стандартные алгоритмы снижают срок службы солнечных батарей и не могут обеспечить стабильный режим максимальной мощности. Предлагаемый алгоритм демонстрирует улучшенную скорость и точность поиска ТММ и при этом не теряет направление отслеживания ТММ при разных условиях освещённости.

### Список литературы

1. **Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M.** Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. USA, FL, Boca Raton: CRC, 2013.

# ОПЕРАТИВНАЯ РАЗРАБОТКА И ПУБЛИКАЦИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ПРАКТИКУМОВ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ

*Тихонов А.И.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Опыт работы в условиях пандемии показал, что проведение лекционных и частично практических занятий не вызывает трудностей при использовании таких систем как Zoom, Webex, Mind, Meetings. В то же время вопрос с поддержкой лабораторных практикумов с удаленным доступом к оборудованию и виртуальных лабораторных практикумов (ВЛП) остается открытым.

Дело в том, что их создание требует пересмотра методических подходов к проведению лабораторных занятий, выполнения большого объема работ и едва ли может быть осуществлено силами преподавателей-предметников. Даже интеграция разработанных виртуальных лабораторных работ (ВЛР) в существующие системы управления обучением (LMS), например, edX, Moodle и Прометей требует их существенных доработок.

Если привлечение профессиональных разработчиков для создания ВЛП для общеобразовательных дисциплин с большими контингентами обучаемых представляется целесообразным, то для специальных дисциплин с числом обучаемых менее 50 за учебный год это едва ли возможно по экономическим соображениям, так как ВЛП – это двойник реального практикума, разработка которого всегда будет иметь приоритет. Рассмотрим подход, позволяющий при сравнительно небольшой трудоёмкости разрабатывать и применять ВЛП в учебном процессе силами преподавателей-предметников с привлечением студентов, но сначала остановимся на том, чем виртуальная лабораторная работа (ВЛР) отличается от обычного веб-приложения.

Во-первых, ВЛР используют нестандартный пользовательский интерфейс, что обуславливает необходимость простой разработки компонентов пользовательского интерфейса – виртуальных устройств, например, термостата, измерительной ячейки, пробивной установки.

Насколько виртуальные устройства должны быть близки к реальным, зависит от поставленных задач, методических подходов и имеющихся ресурсов.

Во-вторых, ВЛР должны быть клиент-серверным приложениями, так как управление пользователями, заданиями вряд ли возможно только на клиенте. ВЛР должна выполняться практически на любом вычислительном оборудовании, включая смартфоны, не требовать установки дополнительного программного обеспечения, что достаточно затруднительно в условиях разнообразия операционных систем и их версий. Все это приводит к необходимости функционирования ВЛР в контексте стандартного веб-браузера. Это позволяет выполнять все трудоемкие вычисления на сервере, клиент же используется только для отображения результатов и взаимодействия с обучаемым. В то же время ВЛР не должна полностью обновлять страницу в браузере, а только ее часть, связанную с действиями пользователя.

В-третьих, используемые технологии должны быть достаточно просты и доступны для преподавателей-предметников, а не только профессиональных разработчиков.

В идеале платформа для разработки ВЛР должна представлять собой что-то вроде конструктора, позволяющего осуществлять сборку приложений из библиотек компонентов, как это имеет место для LMS при создании электронных образовательных ресурсов. Сразу отметим, что в настоящее время таких конструкторов нет. Достаточно близкая к этому концепция реализована в NI LabVIEW, но она недоступна из-за санкций.

Было рассмотрено несколько связок технологий разработки ВЛР для поставленных выше требований. Первая из них – Unity, широко используемая для разработки игровых приложений в том числе и с трехмерной графикой. Приложение пишется на C#, которое затем преобразуется в WebGL, исполняемый в браузере. При высоком качестве графики объем виртуальной лабораторной работы может составлять десятки и сотни мегабайт. В Unity отсутствуют специфические компоненты для разработки ВЛР, так что их приходится создавать для каждой предметной области отдельно. Требования к квалификации разработчиков высокие.

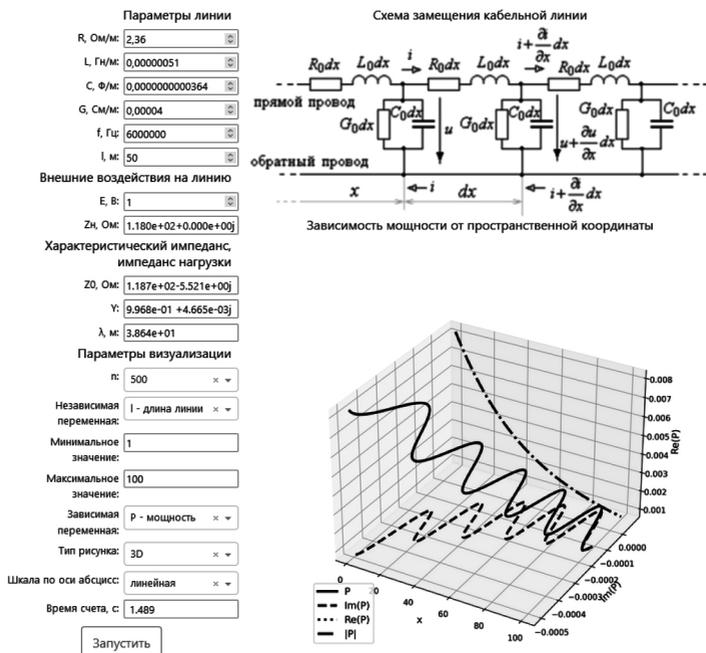
Последние годы в качестве платформы для разработки расчетных приложений, а также веб-приложений широко используется Python. Связано это со следующими факторами: низким порогом вхождения,

высокой производительностью разработки, широким набором библиотек для решения научно-технических и инженерных задач. В связи с этим было принято решение искать связку технологий для разработки ВЛР в экосистеме Python. Претендентами являлись Jupyter Notebook (JN), Panel, Streamlit Dash. Основным назначением перечисленных технологий является создание интерактивных расчетных веб-приложений. Пожалуй, наиболее привлекательным из них является JN, широко используемые в учебном процессе и позволяющие достаточно просто интегрировать в едином документе форматированный текст (Markdown и HTML), формулы (Latex), расчеты (Python, JavaScript, SQL, ...), интерактивную визуализацию, графический пользовательский интерфейс, программную анимацию и видео на одной странице. Это делает JN привлекательной платформой для интерактивных электронных учебников. В то же время ее использование для ВЛР ограничивается тем, что для работы требуется поддержание постоянного сетевого соединения на все время выполнения ВЛР, а также отсутствие удобных средств для создания нестандартных компонентов. Аналогичные недостатки имеет и Panel. Блокноты JN и Panel представляют собой текстовые документы в формате JSON, что позволяет встраивать в них в том числе и изображения. В отличие от JN и Panel Streamlit работает со скриптами Python.

Конечным выбором платформы для разработки ВЛР является Plotly Dash. Он функционирует поверх веб-фреймворка Flask. ВЛР представляет собой традиционное веб-приложение, Dash обладает широким набором готовых компонентов пользовательского интерфейса.

Клиентская часть Dash написана на React. Любое взаимодействие пользователя с приложением приводит к Ajax-запросу, обработке его на клиенте, а если необходимо, то и на сервере, возвращению данных в клиентскую часть ВЛР и обновлению только тех элементов пользовательского интерфейса, которые были затронуты действиями пользователя. Такое построение позволяет писать приложения Dash полностью на Python. Для этого достаточно создать экземпляры классов компонентов, объединить их в раскладке пользовательского интерфейса, написать функции обратного вызова, описывающие реакцию приложения на действия пользователя. В набор стандартных библиотек Dash входит «обертка» всех тегов HTML, поддержка CSS-фреймворка Bootstrap, большое число компонентов, написанных как разработчиками Dash, так и пользовательским сообществом. В частности, следует отметить

## Моделирование кабельных линий при приложении синусоидального напряжений



Виртуальная лабораторная работа для моделирования кабельной линии

библиотеку интерактивной визуализации Plotly, позволяющей в ряде случаев отображать анимационные последовательности. При небольших дополнительных усилиях можно использовать и другие средства визуализации, включая matplotlib.

В тех случаях, когда для разработки ВЛР не хватает функциональности библиотечных компонентов, компоненты для ВЛР пишутся на «чистом» Python, комбинируя изображения, стандартные компоненты Dash. Взаимодействие между ними обеспечивается функциями обратного вызова, включаемыми в компонент, который представляет собой класс Python. Для встраивания компонента в ВЛР достаточно создать его экземпляр и встроить в раскладку приложения. Обратные функции вызова приложения ВЛР используют свойства и методы таких компонентов точно так, как и встроенных компонентов. В версии 2.0 Dash имеется встроенные средства для построения компонентов, использующие сопоставление с образцом. Однако приложения ВЛР с большим

числом такого рода компонентов теряют реактивность и работают достаточно медленно. Была разработана библиотека, обеспечивающая повышение быстродействия компонентов.

На рисунке представлена виртуальная лабораторная работа, использующая компоненты Python. Следует помнить, что написанное на Python выполняется на сервере и требует передачи данных по сети. Для разработки ВЛР и компонентов Python были написаны руководства и шаблоны, которые обеспечивают быстрое вхождение в процесс создания ВЛР и участие в этом процессе студентов при выполнении типовых расчетов. Основной целью в этом случае является публикация интерактивного расчетного приложения Dash.

Когда требуются компоненты, выполняющиеся только на клиенте, а также повторно используемые в нескольких ВЛР, то они пишутся на React, что требует дополнительных навыков. В связи с этим за последние два года в разработке компонентов React участвовал только один студент.

Следует отметить, что приложения Dash – одностраничные (SPA), то есть написать ВЛР достаточно просто, а вот все остальное, связанное управлением пользователями, заданиями и даже описаниями лабораторных работ сделать достаточно сложно. После проведения ряда экспериментов пришлось остановиться на том, чтобы усложнить систему, используя наработки для публикации интерактивных электронных учебников и средства управления контентом и пользователями ранее написанные на Django. Дело в том, что для Django имеется большое число качественных библиотек, позволяющих быстро развертывать функциональные веб-приложения. Трудность состояла в том, чтобы обеспечить встраивание приложений Dash в Django, для чего была использована библиотека `django-plotly-dash`. Основные функции этой библиотеки: встраивание приложений Dash в веб-страницы Django и обеспечение взаимодействия между Django и Dash. Встраивание приложений осуществляется как непосредственно в страницу Django, так и в плавающий фрейм на странице. В последнем случае возможно размещение нескольких взаимодействующих приложений Dash на одной странице Django. Взаимодействие осуществляется как синхронном режиме (выполнения запроса), так и асинхронном через каналы Django. Входные данные в Dash передаются как дополнительные именованные параметры функций обратного вызова, выходные возвращаются функциями

обратного вызова и могут быть сохранены в сессии Django. Именно это позволяет легко осуществить раздачу индивидуальных заданий. По умолчанию анонимный пользователь получает фиксированное специально помеченное задание.

Такое построение ВЛП позволяет достаточно просто реализовать подход управления приложения данными, объединить электронные учебники и ВЛР. Каждому типу образовательного контента соответствует обработчик, например, html, pdf-страниц, видео, исходных текстов программ. Для ВЛР предусмотрено три вида обработчиков, в том числе и для WebGL. Каждому элементу, например, ВЛР, соответствует запись в базе данных, включая тип контента, указатель ресурса, короткий, длинный заголовок, место элемента в иерархии ВЛП. Содержание (оглавление) ВЛП формируется в электронной таблице Excel, которая выгружается на сервер, обрабатывается, помещается в базу данных приложения. Это позволяет легко строить навигационную структуру ВЛП, создавать различные версии одного и того же ВЛП.

Кроме того, для каждого элемента ВЛП указывается принадлежность к ролям (группам) пользователей. В зависимости от роли элемент (ВЛР) может быть доступен или недоступен для пользователя, получать фиксированное или случайное задание из пула заданий. Регистрация пользователей и привязка к ролям осуществляется администратором. Делать это можно как интерактивно в административной подсистеме Django, так и с помощью загрузки электронных таблиц Excel со списками пользователей.

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ПРЯМЫМ ПУСКОМ

*Ооржак А.А., Ширинский С.В.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Рост стоимости электроэнергии, стоимости эксплуатации и обслуживания электрооборудования, связанный с ужесточением экологических и санитарных норм подчеркивают важность постоянной актуализации научной составляющей в применении энергоэффективного электрооборудования.

Планируется рост издержек в энергетической отрасли, связанных с прогнозируемым в ближайшей перспективе повышением цен на ископаемое топливо. Они стабилизируются не раньше 2030 г. В [1] прогнозируется, что общие затраты на энергосистемы увеличатся примерно на 12,3 % к 2025 г. Как следствие, средние розничные цены на электроэнергию будут неуклонно повышаться – до 18 % (по сравнению с уровнем 2010 г.) к 2030-му. В период 2030 – 2040 гг. рост стабилизируется на 20 % ежегодно.

Для достижения заявленных в прогнозе целей единственным способом является сокращение электропотребления. Очевидным значительным резервом такого снижения была и остаётся энергоэффективность применяемого электрооборудования, главным образом – электродвигателей.

По различным оценкам, именно на долю двигателей приходится до 46 % от общемирового потребления электроэнергии; 70 % от этого количества «съедают» двигатели промышленного назначения (до 80 % – асинхронные двигатели). Очевидно, что повышение доли энергоэффективного оборудования, выведение из технологических схем устаревших моделей и разработка новых конструктивных решений помогут заметно сократить энергозатраты.

В связи с этим в 2016 г. было подготовлено второе издание стандарта Международной электротехнической комиссии (МЭК) 60034-30-2, где был представлен новый класс сверхвысокой эффективности (IE5).

В соответствии с этими новыми требованиями в ЕС, начиная с 1 января 2017 г. по настоящее время разрешается использовать двигатели с номинальной мощностью от 0,75 до 375 кВт, соответствующие классу IE3 и IE2, только с применением преобразователя частоты. Начиная с 2020 г. на территории РФ, помимо вышесказанного, вступили в действие требования ГОСТ IEC 60034-30-2-2016 (согласно приказу Минэкономразвития от 2019 г.); это привело к необходимости повышения энергоэффективности эксплуатируемых двигателей.

Целью статьи является определение и исследование нетрудоемких и быстрых методов выявления конфигурации синхронного двигателя с постоянными магнитами с возможностью прямого пуска (СДПМП), соответствующего по уровню энергоэффективности и другим показателям к актуальным требованиям МЭК. Методика должна позволить разработку модели двигателя, ее оптимизации и определению эффективной конструкции ротора СДПМП.

Предыдущие исследования показали, что двигатели с постоянными магнитами могут обеспечить более высокую эффективность, чем стандартные асинхронные двигатели, используемые. Поэтому даже отрасли, где применение двигателей было ограничено асинхронными двигателями, теперь могут извлечь выгоду из преимуществ двигателей с постоянными магнитами [2].

Во многом СМПМ могут заменить АД, так как первые могут быть спроектированы меньшими по размеру, но более эффективными по сравнению с асинхронной машиной. Однако СМПМ не может быть включен без использования преобразователя частоты (ПЧ). Наличие ПЧ снижает общую эффективность и значительно повышает стоимость системы.

Таким образом, гибридизация синхронного двигателя (ведущего себя как АД во время запуска и СМ в установившемся режиме) представляется хорошим решением для улучшения характеристик двигателя в условиях эксплуатации, которые не требуют изменения скорости.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами, который создает асинхронный пусковой момент, называют синхронным двигателем с постоянными магнитами с прямым пуском (СДПМП). Такой двигатель может быть использован вместо обычных асинхронных двигателей для таких применений, где двигатель подключается непосредственно к питающей сети, например, в насосах, кондиционерах и вентиляторах.

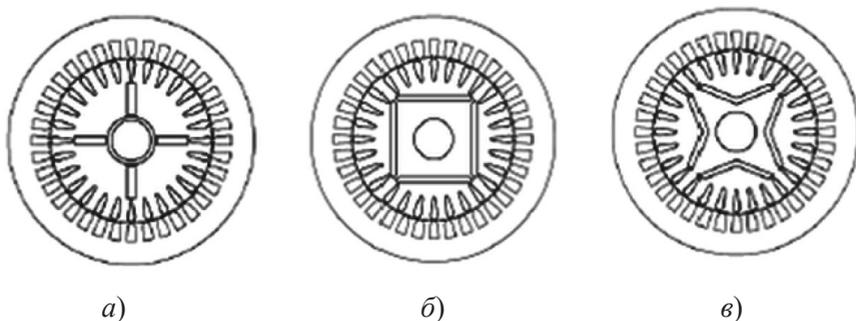
После запуска он работает на синхронной скорости без электрических потерь в роторе, что снижает общие потери на 30 % по сравнению с асинхронной машиной и повышает эффективность с 85 до 89 % при той же выходной мощности.

С точки зрения расположения магнитов СДПМПП может быть представлен двумя типами роторов: ротором с внутренними магнитами и пусковой обмоткой, то есть с магнитами, встроенными в сердечник ротора, и ротором с поверхностными постоянными магнитами и пусковой обмоткой, у которого магниты закреплены на поверхности ротора.

Первый тип ротора с внутренними магнитами отличается высокой прочностью всей конструкции, а также высокой степенью защиты магнитов от размагничивания полем якоря за счет короткозамкнутой пусковой обмотки.

Основное преимущество роторов с поверхностными магнитами – их конструкция гораздо проще и дешевле в изготовлении. Кроме того, СД с поверхностными магнитами способен обеспечить больший синхронный крутящий момент за счет небольшого зазора между магнитами и обмоткой якоря.

Из-за большого количества ограничений, которые необходимо принимать во внимание в процессе проектирования СД, таких, как хорошие пусковые и рабочие характеристики, реактивный крутящий момент, затраты на производство и срок окупаемости, найти оптимальную конструкцию ротора оказывается непросто. Необходимо использовать алгоритмы и программы оптимизации. В работе было принято решение сосредоточить внимание на анализе трех основных конфигураций ро-



Исследуемые конфигурации ротора СДПМПП: ротор с тангенциальными магнитами (а); ротор с радиальными магнитами (б); ротор с V-образными магнитами (в)

тора для выбора наилучшего варианта по коэффициенту мощности и КПД (рисунок).

Математическая модель, предназначенная для расчета характеристик двигателя выбранной конфигурации по заданным размерам, должна быть достаточно быстрой, чтобы интегрироваться в процедуру оптимизации, цель которой – выбор наиболее эффективной конструкции ротора СДПМП.

Существует несколько методов, позволяющих рассчитывать статические характеристики двигателей, которые можно сгруппировать в три больших класса: аналитические, численные и полуаналитические, основанные на расчете схем замещения.

#### *Численные методы (полевые)*

Современное состояние развития информационных технологий позволяет проводить трудоемкие вычислительные процессы на основе ЭВМ, что позволяет получать более эффективные и точные модели.

Существует множество различных численных методов, позволяющих рассчитывать электромагнитное поле в электрических машинах. Наиболее известными из них являются метод конечных разностей (FDM), метод граничных элементов (BEM), метод конечных элементов (FEM), метод дискретных элементов (DEM) и метод конечных интегралов (FIT) [3].

#### *Аналитические методы*

В отличие от численных методов, считается, что аналитические методы основаны на явной формулировке переменных, характеризующих систему. Аналитические уравнения связывают функциональные переменные системы, так называемые рабочие характеристики, с описательными переменными: геометрическими параметрами, характеристиками материала и т.д. Эти аналитические уравнения могут быть записаны с использованием различных упрощающих допущений, применяемых к описательным значениям системы [2].

#### *Полуаналитические методы*

Объединенные вместе аналитические и численные модели создают гибридную модель, например, модель распределенных элементов или модель с сосредоточенными элементами. В этих моделях формулировка элементов сети определяется аналитически, но решение системных уравнений является численным. Поэтому метод называется полуаналитическим или полукочественным. Переход от системы аналитиче-

ских уравнений к матрице довольно прост, особенно с использованием законов Кирхгофа. Параметризация возможна для относительно похожих конфигураций, поэтому геометрия модели может разумно варьироваться [4].

Преимущество моделей с сосредоточенными элементами, таких как схемы с магнитными проницаемостями для магнитных цепей или узловые схемы для решения тепловых задач, имеют то преимущество, что они основаны на хорошо проработанных законах Кирхгофа и различных соответствующих теоремах [5]. Подобно численной модели, скорость и точность модели будут в значительной степени зависеть от ее детализации.

Одним из наиболее точных полуаналитических методов анализа электрических машин является метод зубцовых контуров (МЗК). Этот метод позволит создать быструю и точную модель СДМППП для использования в процедурах оптимизации.

### **Вывод**

Полуаналитический метод выигрывает не только в скорости, но и в точности, являясь при этом идеальным инструментом для анализа и оптимизации энергоэффективной машины. В частности, метод зубцовых контуров предполагает относительно небольшой объем вычислений, но при этом дает частное решение задачи с точностью полевых методов.

### **Список литературы**

1. **EU Reference Scenario 2016 Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050.** [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712\\_Summary\\_Ref\\_scenario\\_MAIN\\_RESULTS%20\(2\)-web.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RESULTS%20(2)-web.pdf)
2. **Елистратова В.** Optimal design of line-start permanent synchronous motor of high efficiency. Ph.D. dissertation. l'École Centrale de Lille, 2016.
3. **Albertier G., LeMenach Y., Ducreux J.-P., Piriou F.** Comparison of slip surface and moving band techniques for modelling movement in 3d with FEM // European Physical Journal Applied Physics // 2005. Vol. 30. № 1.
4. **Do T.P.** Simulation dynamique des actionneurs et capteurs électromagnétiques par réseaux de ré reluctances: modèles, méthodes et outils. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
5. **Петриченко Д.** Contribution la modélisation et la conception optimale des turbo-alternateurs de faible puissance. Ph.D. dissertation. l'École Centrale de Lille, 2007.

# ОБЛЕГЧЕННЫЕ МОНТАЖНЫЕ ТЕПЛОСТОЙКИЕ ПРОВОДА С КОМБИНИРОВАННОЙ (ДВОЙНОЙ) ИЗОЛЯЦИЕЙ

*Шолуденко М.В., Подольская Л.В., Лебедева Е.В.*

*Москва, ОАО «ВНИИКП»*

В ОАО «ВНИИКП» разработана серия неэкранированных и экранированных в защитной оболочке облегченных монтажных теплостойких проводов с комбинированной (двойной) изоляцией марок МК 36-3101, МК 36-1101, МКЭО 36-3101, МКЭО 36-1101.

Провода предназначены для эксплуатации в составе изделий ракетно-космической техники при напряжении до 600 В переменного тока частотой до 10000 Гц или постоянного тока 850 В суммарно для двух слоев изоляции.

Токопроводящие жилы номинальным сечением от 0,05 до 0,20 мм<sup>2</sup> скручены из посеребренных проволок из медного сплава; номинальным сечением от 0,35 до 1,0 мм<sup>2</sup> – из медных посеребренных проволок.

На токопроводящие жилы наложена комбинированная (двойная) изоляция: первый слой в виде обмотки из полиимидной или полиимидно-фторопластовой пленки, второй слой из полиимидного лака.

В многожильных проводах изолированные жилы скручены в сердечник с числом жил 2, 3 или 4. В экранированных проводах поверх сердечника последовательно наложены: экран в виде оплетки из медных посеребренных проволок, защитная оболочка в виде обмотки из полиимидной или полиимидно-фторопластовой пленки.

Испытательное напряжение изоляции постоянного тока в течение 1 мин – 2500 В. Электрическое сопротивление изоляции токопроводящих жил – не менее 750 МОм·км. Электрическое сопротивление оболочки – не менее 30 МОм·км.

Провода стойки к воздействию многократных изгибов при нормальных климатических условиях и пониженных температурах. Число циклов многократных изгибов на угол  $\pm 90^\circ$  при радиусе изгиба не менее 10 наружных диаметров провода:

– не менее 5000 при нормальных климатических условиях;

– не менее 15 при температуре –15 °С.

Провода эксплуатируются при температурах от –150 до 200 °С. Предельная повышенная температура среды при эксплуатации не более 230 °С в течение не более 2 ч.

Срок службы проводов – 30 лет.

Провода не распространяют горение при одиночной прокладке.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ В ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ВЫСОКООБОРОТНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

*Кирякин А.А.<sup>1</sup>, Щетинин Е.В.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Москва, АО «Корпорация» ВНИИЭМ», <sup>2</sup>Москва, НИУ «МЭИ»*

Определение потерь на вихревые токи при создании мощных высокооборотных синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов (ВСГПМ) является актуальной задачей [1]. Учет потерь на вихревые токи позволяет более точно рассчитать параметры и характеристики синхронных машин в установившихся и переходных режимах работы. Значения вихревых токов в постоянных магнитах зависят от уровня и характера нагрузки, а также геометрии магнитопровода в области воздушного зазора. В результате протекания вихревых токов возрастает нагрев постоянных магнитов в локальных областях, их магнитные свойства снижаются, что приводит к ухудшению выходных параметров и характеристик ВСГПМ.

Для исследований потерь на вихревые токи в постоянных магнитах разработана математическая модель расчета распределения электромагнитного поля в ферромагнитном материале с учетом нелинейного характера перемагничивания в динамике [2]. Система уравнений Максвелла сведена к решению системы уравнений в частных производных второго порядка. По результатам расчета поля в материале постоянного

магнита определяются потери от вихревых токов. Уравнения математической модели имеют вид:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \gamma \cdot \mu_d \cdot \frac{\partial H}{\partial t}; \quad -\frac{\partial H}{\partial t} = \gamma \cdot E; \quad i_b = \gamma \cdot E \cdot h;$$

$$R = \frac{a \cdot b}{h \cdot \gamma}; \quad P_b = i_b^2 \cdot R,$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $\gamma$  – удельная проводимость материала магнита;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\mu_d$  – дифференциальная магнитная проницаемость материала магнита;  $i_b$  – наведенные вихревые токи по глубине магнита  $h$ ;  $R$  – сопротивление магнита;  $a, b$  – ширина и длина магнита;

$P_b$  – потери на вихревые токи в постоянных магнитах.

Определение магнитных потерь в постоянных магнитах выполнено на примере четырехполюсного ВСГПМ при частоте вращения ротора 12000 об/мин.

Граничные значения напряженности электромагнитного поля определялись по результатам решения двумерной полевой задачи в поперечном сечении ВСГПМ в функции времени с использованием программы COMSOL Multiphysics.

Решение дифференциальных уравнений поля осуществлялось методом конечных разностей. На поверхности магнита задавался рассчитанный пространственно-временной закон изменения электромагнитного поля. Дифференциальные уравнения преобразовывались в систему линейных алгебраических уравнений с расчетом магнитных свойств в каждой выделенной области магнита. Система линейных уравнений решалась методом прогонки.

Для верификации модели выполнен расчет и сопоставительный анализ потерь на вихревые токи с использованием математической модели определения магнитных потерь в COMSOL. Расчеты выполнены для режимов холостого хода, активной, активно-индуктивной и индуктивной нагрузок ВСГПМ. Расхождение результатов расчетов составило не более 5 %, что позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности моделирования магнитных потерь, полученных с использованием разработанной модели.

## Список литературы

1. Кручинина И.Ю., Антипов В.Н. Проблемные вопросы создания высокоскоростных мини-турбогенераторов и пути их решения // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4.

2. Alexey A. Kiriyaikin, Evgeniy V. Shchetinin. Calculation of Eddy Current Losses in Permanent Magnets of Synchronous Turbine Generators by the Sweep Method / International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021.

## ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА В ИССЛЕДОВАНИИ КАЧЕСТВА И ИССЛЕДОВАНИИ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ СШИВАЕМЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПВХ ПЛАСТИКАТОВ

*Зайцева Д.С.<sup>1</sup> Крючков А.А.<sup>1</sup>, Пронин А.С.<sup>1</sup>, Степанова Т.А.<sup>1</sup>,  
Шувалов М.Ю.<sup>1</sup>, Карпенко Г.В.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Москва, ОАО «ВНИИКП», <sup>2</sup>Стерлитамак, ООО «Баипласт»*

Целью настоящей работы является создание изоляционных радиационно-сшиваемых композиций на основе ПВХ, конкурентоспособных в части термостойкости со сшитым полиэтиленом. Такие композиции должны обеспечивать возможность эксплуатации кабельных изделий при длительно допустимой температуре 90 °С, а также при кратковременных перегрузках и коротком замыкании, при температурах до 130 и 200 °С соответственно.

В докладе отражены результаты первого этапа работы, в ходе которого были разработаны и исследованы два типа ПВХ композиций: общепромышленная (О-ПВХ) и пожаробезопасная (П-ПВХ).

Один из основных вопросов заключался в подборе подходящей дозы облучения (ДО) путем сравнения характеристик пластикатов, определяемых методами «кратковременных» испытаний.

Общепромышленные композиции облучали дозами 4 Мрад (О-1);

8 Мрад (О-2); 11 Мрад (О-3) и 15 Мрад (О-4), а пожаробезопасные композиции – дозами 4 Мрад (П-1) и 8 Мрад (П-2).

Для сравнения параллельно с облучёнными материалами проводились испытания тех же самых необлучённых материалов. «Кратковременные» показатели сравнивались с нормированными значениями, определенными на основании анализа европейской и отечественной нормативной документации (НД) на кабельные изделия. Результаты испытаний представлены в табл. 1 и 2.

*Таблица 1*

Наименование показателя	Требования	Результаты для О-ПВХ				
		До облучения	О-1	О-2	О-3	О-4
Прочность при разрыве, МПа, не менее	12,0	16,1	25,9	25,3	26,4	27,6
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	180	423	181	195	182	125
Кислородный индекс, %, не менее	24	24,5	26,0	28,0	28,5	29,0
Термостабильность при $(200 \pm 0,5)$ °С, мин, не менее	80	305	105	87	65	49

*Таблица 2*

Наименование показателя	Требования	Результаты для П-ПВХ				
		До облучения	П-1	П-2	П-3	П-4
Прочность при разрыве, МПа, не менее	11,5	9,1	12,5	12,4	13,4	11,7
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	220	263	245	227	213	246
Кислородный индекс, %, не менее	32	28,5	32,5	33,5	31,0	26,0
Термостабильность при $(200 \pm 0,5)$ °С, мин, не менее	100	220	121	116	83	89

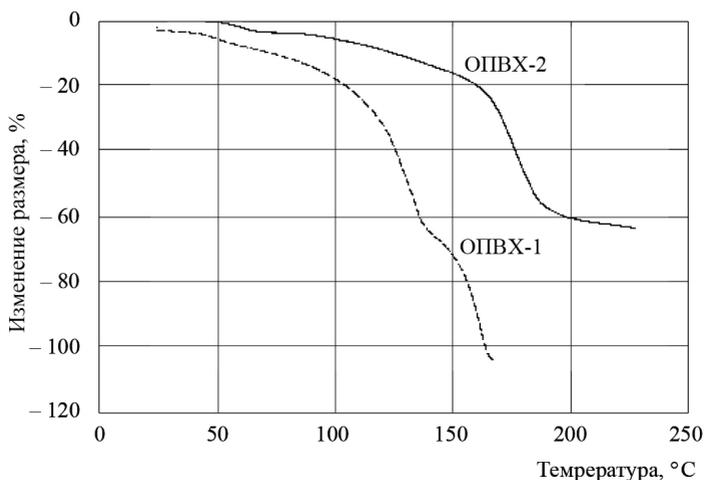
Из таблиц следует, что измеренные характеристики композиций О-2 и П-1 лучше других соответствуют совокупности предъявляемых требований.

Для того, чтобы удостовериться, что при облучении композиций в них происходит сшивание полимерной основы, композиции О-2 и П-1, а также необлученные композиции были исследованы методами термомеханического анализа (ТМА) (рис. 1).

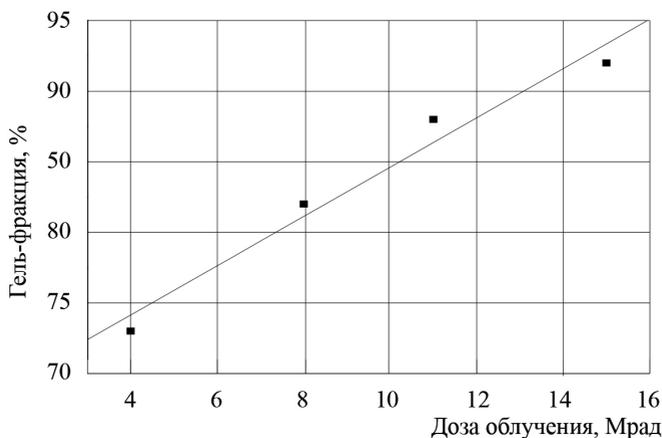
Результаты термомеханического анализа свидетельствуют о сшивании полимерной основы пластикатов в результате облучения, на что указывает заметно меньшая их деформация под нагрузкой.

На рис. 2 представлена зависимость содержания гель-фракции (ГФ) от дозы облучения в образцах О-1 – О-4. Видно, что с увеличением ДО происходит увеличение содержания ГФ, а значит, степени сшивания полимерной основы пластика. Содержание пластификатора, химически связанного с полимером в ГФ, составляет около 3 масс. % от его общего количества.

Важной задачей является оценка долговечности разработанных пластикатов в составе кабельных изделий. Исследования, ранее выполненные в ОАО «ВНИИКП», показали, что при температурах до 100 °С этот показатель контролируется физическим процессом десорбции пластификатора из объёма материала, который сводится к его диффузии через



**Рис. 1.** Характерные кривые ТМА облученной и необлученной композиций при давлении 0,32 МПа



**Рис. 2.** График зависимости геля-фракции от дозы облучения

толщю изоляции и/или оболочки и испарению с поверхности, причем во многих случаях вторая стадия является лимитирующей.

Была разработана методика экспериментального определения кинетических показателей процесса испарения (энергии активации и предэкспоненциального множителя, входящие в выражение для констант скорости реакции по Аррениусу), а также математическая модель первого приближения, позволяющая оценивать долговечность ПВХ изоляции кабеля, обладающим осевой симметрией. Испытания показывают, что при соответствующем подборе пластификатора и режима сшивания ресурс изоляции кабеля при длительно допустимой рабочей температуре 90 °С превышает 60 лет.

### **Выводы**

1. Установлено, что в случае общепромышленной композиции для обеспечения требуемых свойств наиболее подходящей является доза облучения 8 Мрад, для пожаробезопасной – 4 Мрад.

2. Для более точного прогнозирования долговечности кабельных изделий наработаны опытные партии материалов, из них изготовлены и установлены на термическое старение модельные образцы кабеля с облученной изоляцией и термопластичной оболочкой.

# МИКРОКАБЕЛИ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ПОДВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

*Овчинникова И.А., Корякин А.Г., Хахичев А.С.*

*Москва, ОАО «ВНИИКТ»*

Для различных подводных работ (исследования морского дна, аварийно-спасательных работ и т.п.) применяются системы дистанционного управления подвижными объектами. Дистанционное управление подвижными объектами невозможно без использования легких помехозащищенных и высокоскоростных линий связи, обеспечивающих передачу информации между управляемым объектом и пунктом управления. В этом случае волоконно-оптические линии передачи информации на основе оптических микрокабелей являются оптимальным решением.

Принцип функционирования подводной системы дистанционного управления требует от применяемого в ней оптического микрокабеля обеспечения работоспособности в диапазоне температур от минус 4 до плюс 35 °С в условиях скоростной размотки при воздействии высокого гидростатического давления после длительного нахождения (в течение срока службы) в плотно намотанном на специальную катушку (с малым внутренним диаметром) состоянии, в том числе при периодическом воздействии морской воды и изменении температуры окружающей среды в широком температурном диапазоне. Важнейшей особенностью такого микрокабеля является минимальный диаметр и большая строительная длина, так как расстояния, на которых требуется обеспечить связь с объектом, могут достигать нескольких десятков километров. Учитывая, что в большинстве случаев катушка с микрокабелем размещается на подвижном объекте, а пространство для размещения кабеля на таких объектах ограничено, протяженность применяемого кабеля зависит от его диаметра. Чем меньше диаметр, тем большую длину кабеля можно разместить на объекте. Таким образом, дальность управляемого перемещения объекта зависит от размеров кабеля. При этом возможность минимизации массогабаритных характеристик кабеля ограничена необходимостью обеспечить его стойкость к механическим нагрузкам в процессе эксплуатации.

В [1] были подробно описаны исследования по созданию оптических микрокабелей, но поскольку эти кабели рассматривались с точки зрения их применения в бортовых системах, проблемы обеспечения

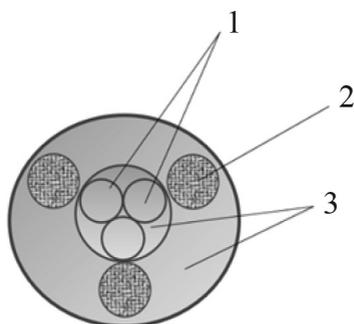
большой строительной длины и, как следствие, существенного снижения коэффициента затухания, не были принципиально важными.

Были исследованы некоторые конструктивные и технологические решения оптических микрокабелей для систем дистанционного управления с точки зрения минимизации массогабаритных характеристик и увеличения строительной длины, в том числе за счет изготовления микрокабеля с изменяющимся по его длине сечением (кабеля с упрочненным концом) [2], так и с точки зрения стойкости к внешним воздействующим факторам и рывку, который происходит в начальный момент размотки (движения объекта).

Результаты определения разрывного усилия у образцов микрокабелей разных конструкций, а также значение разрывной нагрузки упрочненного конца (рис. 1) представлены в табл. 1.

Некоторые результаты исследований представлены на рис. 2–7 (определение стойкости к растяжению, проведенное с помощью анализатора вынужденного рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна – бриллюэновского анализатора, и исследование длительного влияния морской воды на коэффициент затухания) и в табл. 2 (стойкость к воздействию пониженной и повышенной температур – минус 60 и 70 °С, соответственно).

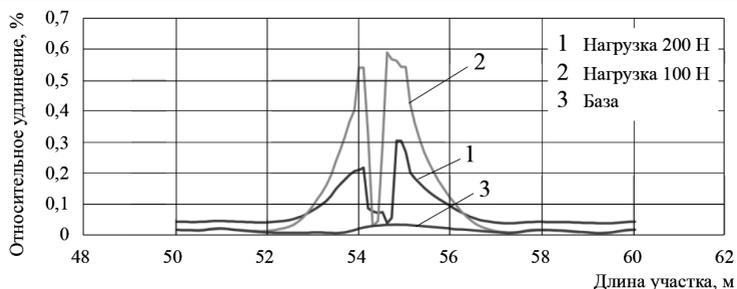
Результаты исследований показали возможность создания оптических микрокабелей строительной длиной более 20 км с диаметром 0,8 мм и менее, обеспечивающих выполнение функциональных задач систем дистанционного управления подвижными подводными объектами, в которых они должны применяться.



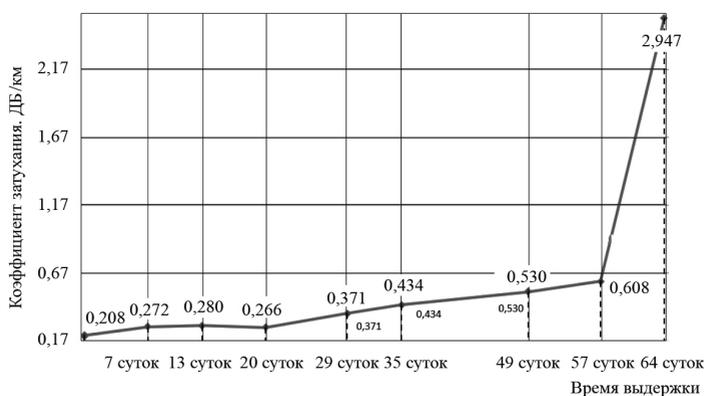
**Рис. 1.** Сечение упрочненного арамидными нитями участка микрокабеля из трех оптических волокон: оптические волокна (1); арамидные нити (2); УФ-отвержденное покрытие из полиакрилата (3) [2]

Таблица 1

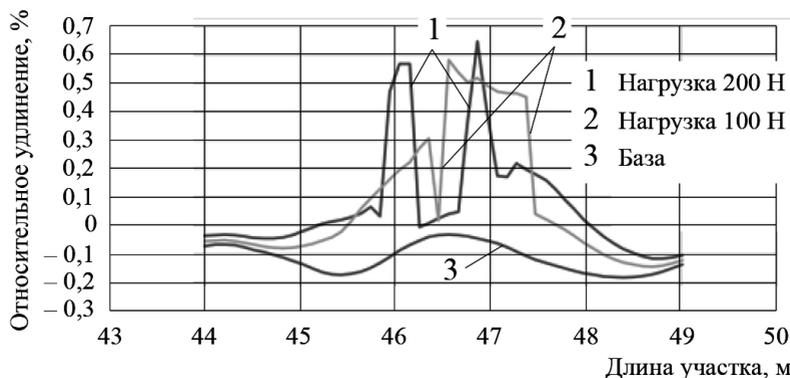
Тип микрокабеля	Разрывная нагрузка, Н
Упрочненный микрокабель диаметром около 1,5 мм (три оптических волокна в оболочке из УФ-отвержденного полиакрилата, дополнительно упрочненные тремя нитями линейной плотностью 29 текс, внедренными в оболочку из УФ-отвержденного полиакрилата)	270
Микрокабель диаметром 0,8 мм (три оптических волокна с диаметром 250 мкм в оболочке из УФ-отвержденного полиакрилата)	210
Микрокабель диаметром 0,6 мм (три оптических волокна диаметром 200 мкм в оболочке из УФ-отвержденного полиакрилата)	215
Микрокабель диаметром 0,45 мкм (одно оптическое волокно в оболочке из УФ-отвержденного полиакрилата)	72



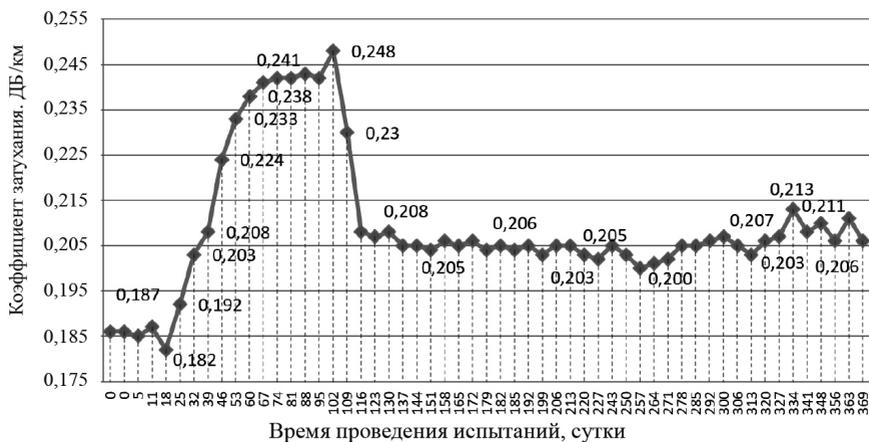
**Рис. 2.** Механические напряжения, возникающие под действием растягивающей нагрузки в оптическом волокне микрокабеля диаметром около 1 мм (далее – ОМК1), состоящего из одного оптического волокна, упрочненного тремя арамидными нитями (60 текс), внедренными в оболочку из УФ-отверждаемого полиакрилата (участок растяжения)



**Рис. 3.** Изменение коэффициента затухания в ОМК1 (на длине волны 1550 нм) в зависимости от продолжительности выдержки в морской воде

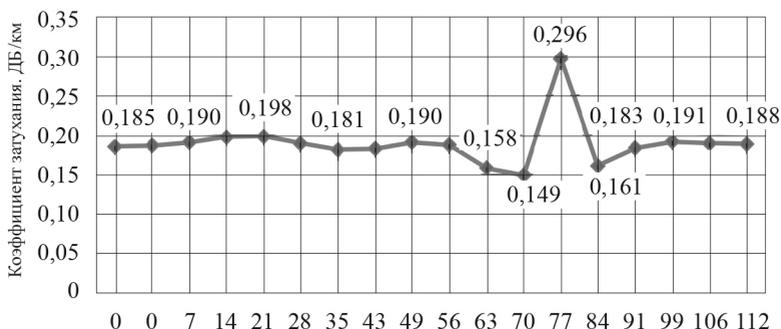


**Рис. 4.** Механические напряжения, возникающие под действием растягивающей нагрузки в оптическом волокне микрокабеля диаметром 0,8 мм (далее – ОМК2), состоящего из трех оптических волокон, внедренных в УФ-отвержденную оболочку из полиакрилата (участок растяжения)

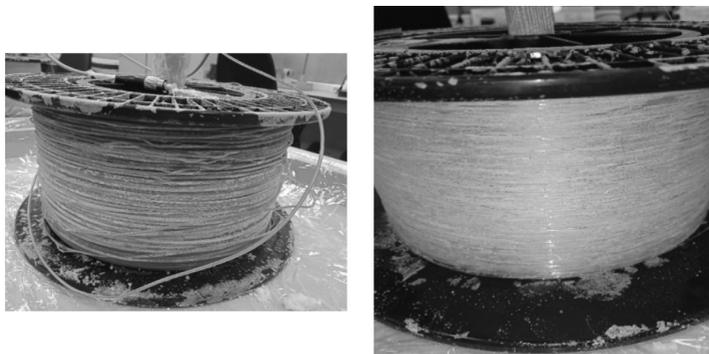


**Рис. 5.** Изменение коэффициента затухания в ОМК2 (на длине волны 1550 нм) в зависимости от продолжительности выдержки в морской воде





**Рис. 6.** Изменение коэффициента затухания в ОМКЗ (на длине волны 1550 нм) в зависимости от продолжительности выдержки в морской воде



*а)*

*б)*

**Рис. 7.** Внешний вид микрокабеля после выдержки в течение одного года в морской воде с концентрацией 38 %: микрокабель с арамидными нитями (нити прорывают оболочку) (*а*); микрокабель без нитей (оболочка не имеет повреждений) (*б*)

### Список литературы

1. **Овчинникова И.А., Васильев Е.Б., Исаков Д.Р.** Создание оптических кабелей специального назначения на основе волокон в плотном буферном покрытии / Труды МКЭЭЭ-2018 (XVII Международная Конференция «Электротехника, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты». М.: Знак, 2018

2. **Овчинникова И.А., Тарасов Д.А., Семенов П.А. и др.** Оптический кабель для систем дистанционного управления // Заявка на изобретение № 2021108640 с приоритетом от 03.03.2021.

# МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДВЕШИВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

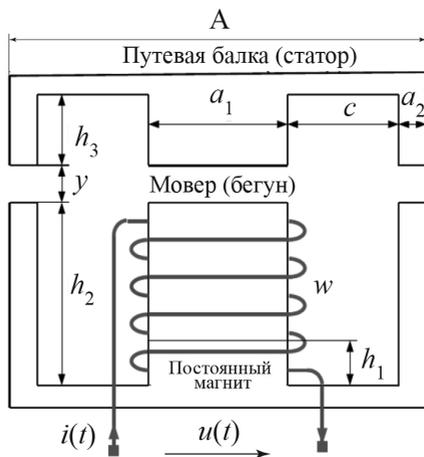
*Смирнов А.М., Комаров В.Г.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Рассмотрим подвесную систему магнитной левитации, где транспортное средство находится под путевой структурой. Для создания тяговых, тормозных и направляющих сил для подвижного состава без механического контакта с путевой структурой необходима тяговая электромагнитная машина (рис. 1), выполняющая роль электромагнитного подвеса.

Система магнитного подвеса состоит из путевой балки, выполняющей роль статора и левитационного силового модуля, выполняющего роль ротора, закреплённого на подвижном составе. Магнитная система с шихтовкой выполнена по Ш-образной схеме, в центральный стержень встроены постоянный магнит, на котором размещается обмотка возбуждения, позволяющая регулировать магнитный поток, и следовательно, подъёмную силу и рабочий воздушный зазор  $y$ .

Основной магнитный поток и электромагнитную силу создает постоянный магнит. В режиме стоянки размера воздушного зазора недостаточно, чтобы ровер вошел в режим левитации. Для того чтобы

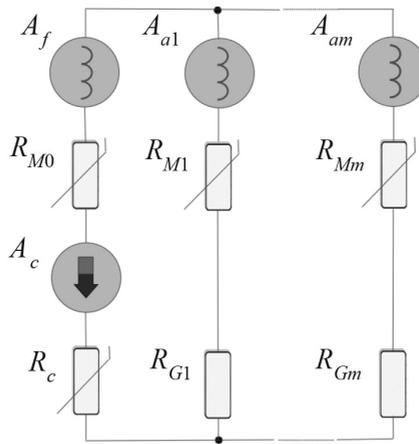


**Рис. 1.** Тяговая электромагнитная машина

создать левитацию, необходимо подать напряжение на регулируемую обмотку, в ней потечет ток, который создаст дополнительный магнитный поток, благодаря чему в зазоре увеличится индукция. Таким образом начнется движение мовера в вертикальном направлении, которое будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнут такой воздушный зазор, при которой будет достаточно электромагнитной силы, чтобы удерживать мовер в стабилизированном положении, в соответствии с вторым законом Ньютона. Регулирующая обмотка возбуждения вместе с ее системой управления выполняет регулирование воздушного зазора, осуществляет включение и отключение режима левитации, а также работает при внешних воздействиях на систему, в частности, когда происходит нагрузка или разгрузка мовера.

На рис. 2 представлена схема замещения магнитной Ш-образной системы; на каждом из стержней расположена одна из трёх фаз обмотки якоря.

На схеме обозначено:  $A_f$  – намагничивающая сила (НС) регулирующей обмотки, А;  $A_a$  – НС обмоток якоря, А;  $A_c$  – НС постоянного магнита возбуждения, А;  $A_c = H_c \cdot h_1$ , где  $H_c$  – коэрцитивная сила постоянного магнита А/м,  $h_1$  – высота (толщина) постоянного магнита, м;  $R_c$  – магнитное сопротивление постоянного магнита;  $R_m$  – магнитное сопротивление стального магнитопровода;  $R_G$  – магнитное сопротивление воздушных зазоров в направлении  $y$ .



**Рис. 2.** Схема замещения магнитной системы электромагнитной машины

Представим уравнения, описывающие математическую модель регулятора воздушного зазора.

Электромагнитная сила:

$$F_{\text{эму}} = \frac{(i_c + i_f)^2 \cdot w_f^2}{2} \cdot \frac{\Lambda_0}{\partial y}. \quad (1)$$

ЭДС регулирующей обмотки:

$$e_f = V_y \cdot (i_c + i_f)^2 \cdot w_f^2 \cdot \frac{\partial \Lambda_0}{\partial y}, \quad (2)$$

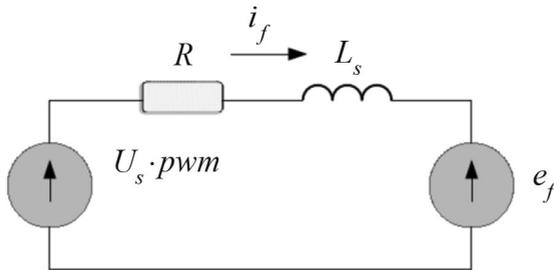
где  $y$  – величина воздушных зазоров, м;  $i_c$  – эквивалентный ток постоянного магнита, приведенный к обмотке возбуждения, А;  $i_f$  – ток обмотки возбуждения, А;  $\Lambda_0$  – магнитная проводимость системы, сочетающая проводимость стального магнитопровода  $w_f$  – количество витков обмотки возбуждения;  $V_y$  – скорость, с которой мовер входит в режим левитации.

Электрическая цепь регулирующей обмотки может быть представлена схемой замещения (рис. 3).

В соответствии со схемой замещения по второму закону Кирхгофа можно записать следующее уравнение:

$$U_s \cdot pwm - e_f = i_f \cdot R_f + L_s \cdot \frac{di_f}{dt}, \quad (3)$$

где  $U_s$  – напряжение источника питания регулировочной обмотки, В;  $pwm$  – функция ШИМ;  $R_f$  – активное сопротивление регулировочной обмотки, Ом;  $L_s$  – индуктивность рассеяния цепи, Гн.



**Рис. 3.** Схема замещения электрической цепи регулировочной обмотки

Удельная электромагнитная сила:

$$f_{\text{эму}} = \frac{F_{\text{эму}}}{m}. \quad (4)$$

Уравнение статического баланса удельных сил:

$$f_{\text{эму}} - g = 0, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Уравнение динамического баланса силы:

$$\frac{(i_c + i_f)^2 \cdot w_f^2}{2} \cdot \frac{\partial \Lambda_0}{\partial y} - g = a_{\text{эму}}. \quad (6)$$

Эквивалентный ток намагничивания постоянного магнита:

$$i_c = \frac{H_c \cdot h_1}{w_f}. \quad (7)$$

Достоинство такой системы подвешивания состоит в том, что сила левитации создается благодаря постоянному магниту, при этом потребление небольшого тока (до 10 А) происходит лишь в режимах включения, отключения левитации, которые длятся десятые доли секунды, а также при нагрузке и разгрузке мовера. В таком исполнении путевая структура защищена от воздействия осадков при нежелательных погодных условиях. Система не находится на земле, соответственно не занимает больших площадей, необходимы лишь небольшие участки для расположения опор путевой структуры. Транспортное средство с таким подвешиванием может быть легким, полная масса состава может составить две-три тонны. По сравнению с традиционным электротранспортом в системе отсутствует ходовая часть, механические передачи, тормозные и пневматические устройства, колеса, противобоксовочные системы, пускотормозные резисторы, цепи ослабления магнитного потока и т.д. Мовер занимает небольшой объем (менее  $0,003 \text{ м}^3$ ), что позволяет свободно размещать различную аппаратуру на борту. Питание регулирующей обмотки осуществляется аккумуляторной батареей, расположенной на борту состава. Магнитная левитация позволяет получить большие скорости движения и значительные ускорения разгона и торможения.

Недостаток заключается в сложной системе управления воздушным зазором. Необходимо использовать датчик положения мовера для отрицательной обратной связи, а также датчик, фиксирующий ЭДС регулирующей обмотки, которая пропорциональна скорости движения мовера в вертикальном направлении. Постоянный магнит размагничивается из-за воздушного зазора, поэтому требуется периодически намагничивать его импульсами тока высокой частоты. Поток рассеяния в магнитопроводе значителен, что снижает левитационную силу и ограничивает нагрузку мовера. Воздушный зазор в режиме левитации невелик, составляет от 5 до 11 мм в зависимости от нагрузки, поэтому для подвешивания существенную роль играет система управления воздушным зазором.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЁТА НАЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

*Горбунов М.С., Саможей О.С.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

Рассмотрим методы расчёта систем тягового электроснабжения. Детерминированные методы расчёта основаны на исследовании графика движения поездов с фиксированными нитями графика и размерами движения. При необходимости учёта влияния такого фактора как неравномерность движения поездов или учёта влияния колебания числа поездов в расчётной зоне применяется вероятностный метод, в котором число поездов в расчётной зоне является случайной величиной. В более сложных цифровых моделях, реализованных на компьютере, процесс моделирования приближен к реальному, он называется методом имитационного моделирования. Нагрузка системы электроснабжения воспроизводится во времени.

Из перечисленных методов расчёта на метрополитене и магистральном транспорте применяется метод имитационного моделирования, так

как он наиболее приближен к реалистичному моделированию с возможностью получения более точных расчётных значений.

В Москве сеть городского наземного электрического транспорта имеет большое количество разветвленных участков, что представляет сложность при использовании метода имитационного моделирования.

В работе ставится задача разработки способов автоматизации выполнения расчётов систем тягового электроснабжения городского наземного электрического транспорта.

Грамотное проведение расчёта системы электроснабжения – основной путь к бесперебойной работе всех систем, включая снижение вероятности выхода из строя подвижного состава. Работу можно разделить на три этапа: сбор исходных данных, электрический расчёт, получение выводов – они же являются рекомендациями к модернизации систем электроснабжения.

1. *Исходные данные.* В перечень получения основных исходных данных входят: схемы питания тяговых подстанций, кабельные линии и точки их присоединения, маршрутный перечень с частотой движения, тип подвижного состава, средняя эксплуатационная скорость подвижного состава. Иногда Служба Заказчика в качестве исходных данных указывает возможность замены кабельных линий на конкретную марку и сечение, приблизительное место расположения новой тяговой подстанции. Для автоматизации расчёта на этом этапе предлагается создание сводной таблицы по перечню исходных данных и базу данных.

2. *Электрический расчёт.* На этом этапе работы выполняются следующие задачи: расчёты нагрузок на участках питания тяговых подстанций, расчёты нагрузки кабельных линий, сопротивления кабелей, падения напряжения на кабельных линиях, контактной сети, рельсовой сети, расчет эффективных токов и коэффициентов эффективности, плотности тока в контактных кабелях, работа системы в вынужденном режиме, расчёт уставок линейных выключателей. В настоящее время возможна частичная автоматизация расчёта, так как при изменении каких-либо исходных данных необходима корректировка данных в ячейках. Ранее упоминалось, что весь расчёт имеет нелинейный вид, по этой причине одно и то же значение может иметь разные формулы для расчёта, но определение более точной формулы производится по конкретным исходным условиям, к примеру, формула расчёта коэффициентов падения напряжения в контактном проводе и рельсовой цепи имеет вид:

$$\Delta k_{\text{кв}} = \left( \frac{3 \cdot 2,8 - 2}{2 \cdot \frac{I_{\text{оч}}}{I_{\text{трм}}}} \right) + 1; \quad \Delta k_{\text{рв}} = \left( \frac{3 \cdot 2,8 - 2}{2 \cdot \frac{\sum I_{\text{оч}}}{I_{\text{трм}}}} \right) + 1.$$

Данные расчёты актуальны при питании участка одним кабелем (правильное название – одностороннее питание участка), а при двустороннем питании участка, когда участок питают два кабеля с двух сторон участка:

$$\Delta k_{\text{кв}} = \left( \frac{2 \cdot 2,8 - 1}{2 \cdot \frac{I_{\text{оч}}}{I_{\text{трм}}}} \right) + 1; \quad \Delta k_{\text{рв}} = \left( \frac{2 \cdot 2,8 - 1}{2 \cdot \frac{\sum I_{\text{оч}}}{I_{\text{трм}}}} \right) + 1.$$

Как видим, поменялись коэффициенты и, следовательно, само значение. И это лишь один пример разницы расчётов. Зная все исходные условия, от которых зависит ход расчёта, можно создать алгоритм для упрощения создания программы автоматизированного расчёта.

3. Получение выводов. На основании полученных расчётных данных на третьем этапе предлагаются рекомендации по усилению участков систем электроснабжения: перекладка кабельных линий, усовершенствование контактной сети, замена проводов на большее сечение, подвешивание усиливающего провода, модернизация тяговых подстанций. В качестве автоматизации этого этапа можно применить набор шаблонных решений, которые опциональны в виде изменения длины кабелей или контактного провода, так как многие формулировки по выводам практически одинаковы. Приведём пример формулировки выводов по выполненному электрическому расчёту.

Проложить от подстанции три отрицательных кабеля 5956', 5957, 5958 взамен работавших на троллейбусной сети на Зелёном проспекте. Марка кабеля АСБ-2К-1кВ, сечением 800 мм<sup>2</sup> ориентировочной длиной 900 м каждый.

Как видим, функциональными позициями могут выступать: номер кабельной линии (в данном случае отрицательный), указание прошлой задачи снабжения (здесь это троллейбусная линия), марка и сечение ка-

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
Наименование	Наименование	Длина участка	Число делений (различные транзиты)	Нагрузка участка	Наименование	Тип кабеля	Транзитная длина кабеля	Соразмеренный кабель	Нагрузка кабеля	Дополнительная нагрузка кабеля	Поразрядный коэффициент	Падение напряжения в кабеле	Поразрядный коэффициент	Поразрядный коэффициент	Среднее значение в среднем в контурных проводках и раскладке	Максимальное значение в раскладке	Коэффициент эффективности	Эффективный ток участка	Максимальная мощность тока в контурных проводках	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
59	5906-K	870	26	688	5906	АСБ-1х800 АСБ-1х800	1435	0,027	688	2160	1,60	29,6	2,06	31,2		54,1	1,47	1011	4,6	
					5956	АСБ-1х800	900	0,034	457	1080	1,17	18,3	1,31	5,0	5,7					
	5905-С3	370	28	292	5905	АСБ-1х800 АСБ-1х800	1030 1050	0,020	292	2180	2,40	13,7	3,50	9,6		46,2	1,93	564	2,6	
					5957	АСБ-1х800	900	0,034	457	1080	1,17	18,3	2,06	4,7	3,4					
	5902-С2	470	26	371	5902	АСБ-1х800	650	0,025	371	1080	2,10	19,2	2,96	20,8		59,0	1,77	658	4,8	
					5958	АСБ-1х800	900	0,034	458	1080	1,17	18,3	2,06	0,6	0,4					
5904-С5	400	26	316	5904	АСБ-1х800 АСБ-1х800	187	0,004	316	1080	2,30	2,9	3,31	16,9		38,5	1,88	593	2,7		

Рис. 1. Пример электрического расчета

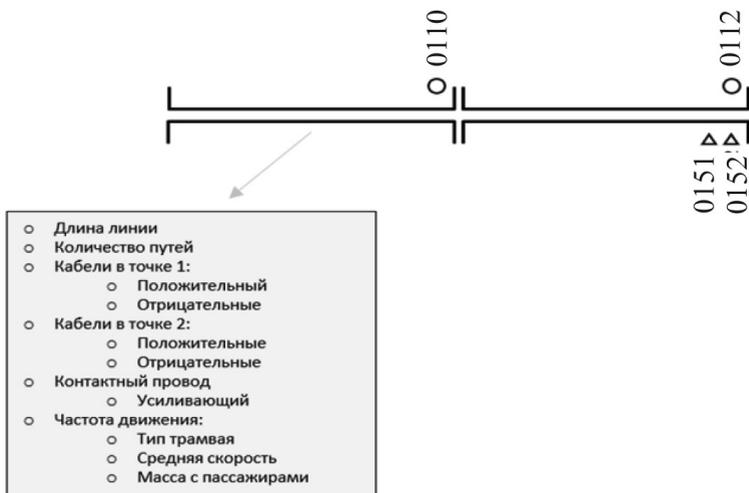
беля, приблизительное место прокладки.

После аналитической работы по выявлению возможности автоматизации, предлагается два варианта выполнения работы по созданию софта для автоматизированного электрического расчёта. Первый, более простой, «базовый» – на основе логики и создания формул на базе MSExcel, второй более сложный – программа на языке программирования (язык будет определен на основе сложности выявленных задач).

На данный момент имеется теоретическая часть электрического расчёта, а также его решение с применением MSExcel. С таким программным обеспечением возможен расчёт во всех режимах работы, а также расчёт уставок линейных выключателей и секционных изоляторов. Наглядный пример электронной таблицы приведен на рис. 1.

Таблицы приведены к формату по требованию оформления проектной документации, что упрощает их перенос для оформления при передаче Службе Заказчика. Ранее упоминалось, что эта система не идеальна, многие задачи, которые описаны выше, приходится редактировать вручную и полной автоматизацией данный формат назвать нельзя. Если сравнивать с полностью ручным выполнением расчётов, то ускорение проведено примерно на 30 %, что значительно сокращает время выполнения расчёта.

В дальнейшем язык программирования будет выбран, исходя из возможностей программного обеспечения и простоты. Сейчас можно



**Рис. 2.** Пример интерфейса модели

предварительно представить, какой вид будет иметь программа, написанная на языке программирования.

Имеется опциональная модель участка (рис. 2), которую при добавлении в активное поле необходимо настроить, задать исходные данные через активную панель. Если участок с разветвлением, то настраивать надо будет каждое плечо, которое проходит через стрелочный перевод. Каждый такой участок, добавленный на рабочее поле, будет между собой связан, чтобы собирались расчётные уравнения. Далее достаточно будет нажать кнопку «расчёт» и программа по логике должна выдать сформированную таблицу как приведено выше при расчёте через MSExcel.

Автоматизация выполнения электрического расчета является актуальной задачей. В настоящее время многие компании ищут пути упрощения работы при выполнении трудоёмких расчётов систем электроснабжения, в том числе и расчётов городского наземного электрического транспорта. Программное обеспечение по автоматизации электрических расчётов ещё не готово для массового использования, но работа в этом направлении ведется разносторонняя и, возможно, в скором времени мы сможем увидеть полностью функциональный продукт.

# РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

*Сметанин В. В., Денисенко В. И., Лыткин В.В.,  
Луконин Д. А. Двоеглазов К. Н.*

*(Екатеринбург, Уральский Федеральный Университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина)*

В настоящее время в Российской Федерации в рамках проектного направления «Прорыв» осуществляется создание опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) на базе реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 [1]. Одной из целей ОДЭК является разработка технологий и оборудования, позволяющих минимизировать как капитальные, так и эксплуатационные затраты. Одним из источников капитальных затрат является осуществление большого количества проходок в биологической защите радиационно-защитных камер (РЗК) для размещения валов передачи вращающего момента. Для уменьшения данного вида затрат предложено размещать электродвигатели внутри РЗК. В связи с этим появилась задача в разработке электродвигателей, способных работать в условиях ионизирующего излучения и высокой дозовой нагрузки, вплоть до  $10^8$  Рад.

На сегодняшний день отечественные и зарубежные производители электродвигателей для увеличения срока службы электродвигателя прибегают к усилению такой же органической изоляции (например, с помощью кремний-органического лака КО-916К).

Наиболее заметных результатов достигли зарубежные производители и исследователи США, Европа, Япония и Китая [1 – 4]. Работа в основном направлена на получение прочной изоляции обмоточного провода электродвигателей переменного тока [5]. Производители предлагают как гибридные (соединения органических и неорганических веществ), так и полностью неорганические виды изоляции [3, 6]. Наи-

более известные производители: ELANTASPDG, Inc (США), Composite Technology Development, Inc (США), Baldor Electric Company (США), 3М (США), Toshiba (Япония), Hitachi (Япония) [7 – 10].

Иностранные компании-производители электродвигателей и исследователи работают в направлении, где изучаются и совершенствуются только сами изоляционные материалы [11]. Основной целью разработки большинства производителей изоляционных материалов является достижение стабильных электроизоляционных свойств и долговечности при высоких температурах и при работе от преобразователя частоты [3].

Для создания радиационно-стойких электродвигателей, как показал анализ систем изоляции двигателей различного назначения зарубежных и отечественных предприятий, наиболее целесообразно использовать изоляцию на основе стеклопластика и полиимидов.

Эмалированные полиимидные медные провода имеют высокую термостойкость. Исследования показывают, что процесс имидизации позволяет эмалированной проволоке выдерживать температуру до 240 °С при непрерывной работе [8]. Такое покрытие или пропитка практически не теряет диэлектрических свойств при повышении температуры по сравнению со стандартной органической изоляцией. Мировая промышленность впервые годы открытия полиимидов была лидером по их производству в лице американской компании, использующей лак Ruge-ML от DuPont [13]. На данный момент существует большое количество производителей и аналогов, в том числе и в России, а именно, компания «Псковкабель» [14]. Их проводники соответствуют параметрам, представленным в исследованиях полиимидов [13 – 17].

В Центре инноваций и внедрения (ИИК) «Электротехтехноком» Уральского федерального университета совместно с ОАО «ВНИИНМ», ЗАО «Уралэлектромаш» и ООО «РусАтом-Инжиниринг» созданы два опытных образца управляемых радиационно-стойких асинхронных двигателей (ДАР). Эти образцы разработаны и изготовлены в комплексе дистанционного управления с дистанционным обслуживанием в рамках создания проектной зоны прорыва ОДЭК. Эти электродвигатели могут работать при уровне радиоактивного излучения, достигающем 108 рад и имеющем степень защиты ДАР от внешних воздействий IP. Прототип ДАР (см. рисунок) был изготовлен на основе электромагнитного сердечника серийных асинхронных двигателей аналогичной

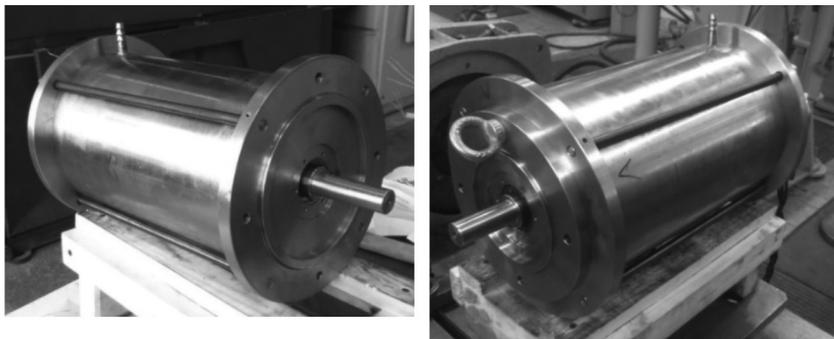
мощности и скорости вращения ЗАО «Уралэлектромаш».

Исполнение двигателей по способу защиты от воздействия внешней среды (IP 68) предполагает полную герметичность конструкции корпуса. В связи с этим задний подшипниковый щит выполнен «глухим», то есть двигатель имеет один конец выходного вала на переднем щите с использованием уплотнения на основе радиационно-стойкого граффлекса, подпрессованного пружиной.

Особенностью системы охлаждения двигателя является комбинированное охлаждение. Станина, в которую впрессован сердечник статора с обмоткой, имеет рубашку с впускным и выпускным патрубками для подачи охлаждающей воды. Кожух жидкостного охладителя и подшипниковые щиты двигателя имеют естественный теплообмен с окружающей химически агрессивной средой, температура которой достигает  $+80^{\circ}\text{C}$  [1].

Зависимость температуры от расхода воды с учетом естественного теплообмена корпуса с окружающей средой для наиболее нагретой части обмотки статора определяет выбор класса изоляции машины, конструкцию подшипниковых щитов, определяет выбор смазки подшипников и температуру воды на выходе из охладителя [2].

В результате исследования было установлено, что увеличение скорости потока по отношению к принятому проекту не даст существенного улучшения охлаждения. Как показали расчеты, уровень нагрева изоляции обмотки статора, а также подшипниковых узлов с радиационно-стойкой смазкой не превышает допустимых значений температуры для примененных материалов указанных элементов конструкции опытных образцов ДАР.



**Рис. 1.** Прототип двигателя ДАР

Испытания опытных образцов ДАР были выполнены в ЗАО «Уралэлектромаш» при питании от сети в соответствии с полной стандартной программой испытаний, по которой испытывают новые конструкции асинхронных двигателей для межведомственной приемки новой продукции.

Испытания опытных образцов радиационно-стойких электродвигателей в составе электропривода (с системой управления) проведены в научно-исследовательской лаборатории кафедры электрических машин ИВЦ «Электромехтехноком» УрФУ.

Стендовые испытания опытных образцов ДАР, проведенные в испытательной лаборатории ЗАО «Уралэлектромаш» и в ИВЦ «Электромехтехноком», подтвердили, что разработанные двигатели по электромагнитным параметрам, тепловым, энергетическим и пусковым характеристикам полностью соответствуют серийным асинхронным двигателям аналогичной мощности и частоты вращения, выпускаемых ЗАО «Уралэлектромаш», и удовлетворяют требованиям технического задания. Разработанные опытные образцы в ближайшее время на одном из предприятий ГК «Росатом» будут испытаны на работоспособность в условиях непрерывного облучения с дозовой нагрузкой до  $10^8$  Рад ( $10^6$  Грей).

На сегодняшний день существует ещё три разработки двигателей новой конструкции и способов формирования магнитных полей с применением радиационно-стойких материалов.

### Список литературы

1. **Shadrin A.Y., Dvoeglazov K.N., Ustinov O.A., etc.** Ph process as a technology for reprocessing mixed uranium-plutonium fuel from brest-od-300 reactor // Radiochemistry. 2016. Vol. 58. № 3.
2. **Mera G., Gallei M., Bernard S., Ionescu E.** Ceramic nanocomposites from Tailor-made preceramic polymers // Nanomaterials. 2015. № 2 (5).
3. **Maitra S.** Nanoceramic matrix composites: types, processing and applications // Advances in ceramic matrix composites. 2014. 45.
4. **Wang S.F., Zhang J., Luo D.W., Gu F., Tang D.Y., Dong Z.L., Tan G.E.B., Que W.X., Zhang T.S., Li S., Kong L.B.** Transparent ceramics: Processing, materials and applications // Progress in solid state chemistry. 2013. 1-2 (41).
5. **Matizamhuka W.R.** Spark plasma sintering (SPS) – an advanced sintering technique for structural nanocomposite materials // Journal of the southern African institute of mining and metallurgy. 2016. 12 (116).

6. **Palmero P.** Structural ceramic nanocomposites: a review of properties and powder's synthesis methods // *Nanomaterials*. 2015. 2 (5).
7. **Mayofis I.M.** Chemistry of dielectrics, Textbook for students of energy specialties of universities. M.: Higher School, 1970.
8. **Ivanova O., Williams C., Campbell T.** Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges // *Rapid prototyping journal*. 2013. 5 (19).
9. **Weijun Yin, Kevin Flanagan, Rian Zhao, Dave Artus, Charles Sigler, Xiaochuan Jia, Hao Huang.** High Temperature Nanocomposite Insulation for High Power Density Machines. GE Aviation Systems Dayton, OH 45409, USA and GE Global Research Center Niskayuna, NY12309, USA, 2013.
10. **Vadim Iosif, Daniel Roger, Stéphane Duchesne.** Assessment and Improvements of Inorganic Insulation for High Temperature Low Voltage Motors. Univ. Artois, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE). EA4025 Technoparc Futura, F62400 Bethune, France.
11. **Loschakov I.** Introduction to dosimetry and protection against ionizing radiation. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2008.
12. **GOST 20426-82.** Non-destructive testing. Radiation flaw detection methods. Application area.
13. **Baranov M.V., Beketov A.R., Denisenko V.I., Plastun A.T., Gayfutdinov A.R., Lukonin D.A., Gudaev Sh.D.** Nano-oxide materials for increasing the operational characteristics of AC machines // *Proceedings of the Sverdlovsk Research Institute of Chemical Engineering*. 2013 . 20 (84).
14. **Patent RU 287296.** Method for the production of polyimides / Pravednikov A.N., Teleshov E.N., Vasilieva I.V. Patent publication: 27.10 .1971.
15. **National Institute of Standards and Technology. Physical Meas.** Laboratory [electronic resource]: database. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
16. **Zvantsev A.A., Klimanov V.A., Ksenofontov A.I. et al.** A collection of problems on the theory of transfer, dosimetry and protection against ionizing radiation: a training manual. M.: NRNU MEPhI, 2011.
17. **Patent RF 2547682.** A method of obtaining an electrical insulating coating on the surface of an electrically conductive material / Baranov M.V., Denisenko V.I., Lukonin D.A., Nikulin S.L., Plastun A.T. / Priority from 10/09/2013, registration 03/16/2015.

# АНАЛИЗ МОДУЛЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛТРО МЬЯНМЫ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

*Чжоу З. Х., Глушенков В. А., Комаров В. Г.*

*Москва, НИУ «МЭИ»*

В статье представлено моделирование алгоритма отслеживания максимальной мощности (MPPT) PerturbandObserve (P&O), используемого в электроснабжении транспортной системы с использованием солнечной энергии на основе системы магнитной левитации Мьянмы. В Мьянме недостаточно традиционных энергоносителей и электростанций. По современным данным валовые ресурсы солнечной энергии Мьянмы составляют 1,15 миллионов ТВтч в год, а среднегодовой приход солнечной радиации (СР) составляет приблизительно 5 кВтч/квм в сутки. Это дало повод для поиска путей использования солнечной энергии в транспортной системе. Немаловажным является экологический аспект особенно в условиях жаркого климата Мьянмы. Сетевая магистральная солнечная электростанция ЭЛТРО – идеальный способ получения электроэнергии, не требующий земельных площадей. Она состоит из источника электроэнергии – солнечных модулей, расположенных над магистральными путями ЭЛТРО-системы, накопителей энергии, резервных газотурбинных электрогенераторов, распределительных сетей потребителей и сетевых инверторов, которые преобразуют напряжение постоянного тока 550 В в требуемое для потребителей напряжение 220 или 380 В переменного тока. Вклад вносится в несколько аспектов всей транспортной системы, включая конструкцию повышающего преобразователя постоянного тока, схемы системы электропитания и программирование контроллера [1 – 2].

Основными элементами модуля энергосистемы являются солнечные батареи СБ, состоящие из набора последовательно-параллельно соединенных фотоэлектрических модулей (ФМ); повышающий преобразователь постоянного напряжения; блок управления поисков точки максимальной мощности с помощью алгоритма MPPT; система буферного накопителя энергии на базе аккумуляторных батарей и выходной инвертор напряжения для прилегающих территории. Построение схе-

мы модуля энергосистемы ЭЛТРО выполнено с помощью программной среды kiCad.

Требуемым условием построения комплексной модели системы электроснабжения является согласование моделей элементов как части единой энергетической системы, что определяет выбор единого универсального инструмента моделирования. Алгоритм MPPT реализован с помощью функционального блока MatLab и использованием программных кодов на языке C. Модели всех компонентов силовой установки реализованы в MATLAB/Simulink в виде отдельных подсистем, что позволяет использовать их для изучения режимов работы модуля энергосистемы в свободной конфигурации [2].

Регулирование выходного напряжения в преобразователе постоянного тока достигается путем постоянной регулировки количества энергии, поглощаемой от источника и вводимой в нагрузку, которая, в свою очередь, регулируется относительной длительностью интервалов накопления и потребления. Эти два основных процесса энергии образуют цикл переключения.

В моделировании процесса алгоритм MPPT зависит от входной

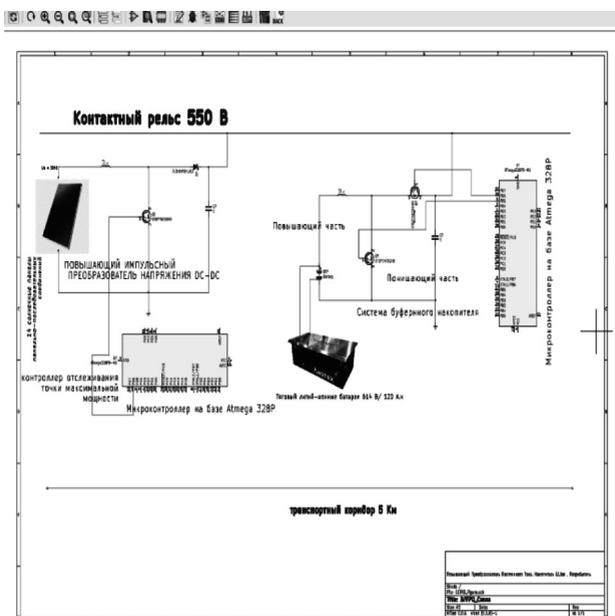


Рис. 1. Схема построения модуля энергосистемы ЭЛТРО в kiCad

мощности, входного напряжения, значений входного тока от солнечной батареи и коэффициента заполнения повышающего преобразователя постоянного тока. Коэффициент мощности солнечных панелей ограничен в первую очередь географической широтой и значительно варьируется в зависимости от облачности, запыленности, продолжительности дня и других факторов.

Солнечная энергия в Мьянме потенциально может генерировать 51973,8 ТВтч/год, в среднем более пяти солнечных часов в день. Мьянма открыла свою первую солнечную электростанцию (СЭС) в Минбу, подразделение Магуэй, в ноябре 2018 г. Эта СЭС будет производить 40 МВтч электроэнергии на первом этапе эксплуатации и 170 МВтч после полной эксплуатации. Страна стремится производить 8 % электроэнергии за счет возобновляемых источников – энергии ветра и солнца к 2021 г. и 12 % к 2025 г. [1].

Повышающий преобразователь постоянного тока нуждается только в четырёх внешних компонентах: индукторе, электронном переключателе, диоде и выходном конденсаторе. Таким образом, преобразователь может работать в двух различных режимах в зависимости от ёмкости накопителя энергии и относительной продолжительности периода переключения.

Солнечные панели из монокристаллических фотоэлектрических элементов более эффективны, но являются и более дорогими в пересчёте на ватт мощности. В настоящее время средний КПД солнечных панелей составляет 18 %, а максимальный 47 %. Для расчёта принято среднее значение КПД (18 %). Для ЭЛТРО выбран солнечный модуль Delta BTS 340-72 P (рис. 2).

Параметры полупроводника: N-канальный полевой транзистор ме-



**Рис. 2.** Солнечный модуль Delta BTS 340-72 P

талл-оксид-полупроводник STB20NM50 (550В, 20А).

Технические характеристики конденсатора – электролитический конденсатор КЕМЕТ 1000  $\mu\text{F}$ , 550 В постоянного тока, винтовое крепление – ALS61A102ME550.

Технические характеристики индуктора – FIT 106-1, высокочастотный тороид индуктора 253  $\mu\text{H}$ /153 $\mu\text{H}$ , 10 %, 10 кГц.

Технические характеристики диода Шоттки – G2FSA 2000В, 20А.

При стандартном состоянии солнечной батареи  $P = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$  и использовании солнечного модуля Delta BTS 340-72 Р входное напряжение от 14 солнечных панелей,  $U_{\text{вход}} = 536 \text{ В}$ , выходное напряжение для электротранспорта,  $U_{\text{вых}} = 550 \text{ В}$ . Генерируемая мощность от 14 солнечных панелей,  $P_{\text{ген}} = 3713 \text{ Вт}$ .

Примем, что пульсации тока  $\Delta I \approx 5 \%$ .

$$\text{Выходной ток, } I_O = \frac{P_{\text{ген}}}{U_{\text{вых}}} = 7 \text{ А,}$$

$$\Delta I = 0,05 \cdot I_O \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 0,36 \text{ А.}$$

Примем, что пульсации напряжения  $\Delta V \approx 1\%$ , тогда

$$\Delta V = 0,01 \cdot U_{\text{вых}} = 5,5 \text{ В.}$$

Минимальное значение индуктивности

$$L_{\text{мин}} \gg \frac{U_{\text{вх}} (U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}})}{\Delta I \cdot f_s \cdot U_{\text{вых}}} = 0,019027 \text{ H.}$$

Ёмкость конденсатора

$$C = \frac{I_O (U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}})}{\Delta V \cdot f_s \cdot U_{\text{вых}}} = 3,0128 \text{ F.}$$

Частота переключения  $f_{\text{sw}} = 10 \text{ кГц}$ .

$$\text{Рабочий цикл } D = 1 - \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}}.$$

Разработанная имитационная модель ЭЛТРО с буферным накопителем энергии состоит из четырех основных компонентов: блока приема солнечной радиации, СБ, повышающего преобразователя постоянного

напряжения, электрической нагрузки. Все модели компонентов выполнены в виде отдельных подсистем в программной среде MATLAB/Simulink и обладают свойством масштабирования. В процесс моделирования добавлен блок алгоритма МРРТ с помощью программирования на языке С.

Основной принцип его работы состоит в коммутации электронных ключей (транзисторов), которая позволяет управлять выходными электрическими переменными с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и МРРТ алгоритма Perturb&Observe (P & O). В результате получаем напряжение на выходе, равное 550 В.

Как правило, метод P &O используется для отслеживания максимальной мощности (МРР). В этом методе вводится незначительное возмущение, вызывающее изменение мощности фотоэлектрического модуля. Выходная мощность фотоэлектрической системы периодически измеряется и сравнивается с предыдущей мощностью. Если выходная мощность увеличивается, то процесс продолжается, в ином случае знак возмущения меняется на противоположный. В этом алгоритме возмущение подается на фотоэлектрический модуль или напряжение матрицы. Напряжение фотоэлектрического модуля увеличивается или уменьшается, чтобы проверить, увеличивается или уменьшается мощность. Если рост напряжения приводит к увеличению мощности, это означает, что рабочая точка фотоэлектрического модуля находится слева от МРР. Следовательно, требуется дальнейшее возмущение вправо, чтобы достичь МРР. И наоборот, если рост напряжения приводит к снижению мощности, это означает, что рабочая точка фотоэлектрического модуля находится справа от МРР, и следовательно, для достижения МРР требуется дальнейшее возмущение влево.

### **Список литературы**

1. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6.

2. **Обухов С.Г., Плотников И.А., Крючкова М.** Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel / IP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2016. vol. 132: Modern Technologies for Non-Destructive Testing.

# СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ПОДВЕСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРОКЛАДКИ

*Корякин А.Г., к.т.н., Холодный Д.С., к.ф-м.н.*

*Москва НИУ «МЭИ»*

Подвесные оптически кабели (ОК) и кабели, проложенные в туннелях, содержат жесткие или скользящие крепления для фиксации положения кабельных линий, представляющих собой подвижные и гибкие конструкции. Сейсмические волны или периодические ветровые воздействия на открытых пространствах приводят к значительным механическим нагрузкам, и могут привести к чрезмерным колебаниям кабельных изделий [1].

В работе выполнено аналитическое исследование устойчивости оптических кабелей, подверженных периодическим механическим колебаниям, с целью получить выражения в замкнутой форме, которые позволяют быстро оценить стабильность системы оптический кабель-крепление. Исследована форма колебаний ОК при небольшом соотношении прогиба к пролёту. Натяжение оптического кабеля рассматривается в рамках модели струны при параметрическом возбуждении. Следует отметить, что необходимо избегать чрезмерных усилий механического натяжения, которые могут привести к повреждению оптического кабеля, или очень малых встречных колебаний, которые могут привести к кратковременному провисанию тросов и их перехлесту. Таким образом, цель работы заключается в оценке обоснованности использования натяжения и способов крепления для проектирования подвесных систем с оптическими кабелями с учетом безопасных условий эксплуатации. Частотный спектр вибрации кабеля сравнивается с диапазоном амплитуд и частот колебательного движений опор или креплений.

Правомерным является подход, при котором оптический кабель можно смоделировать как струну или трос, подвешенный между двумя точками, тем более что трос может присутствовать и в самой конструкции ОК. Периодическая механическая нагрузка во время землетрясения вызывает колебания на концах кабеля. Анализ такого процесса,

как наложенное смещение хотя бы одного из граничных условий, позволяет получить дифференциальное уравнение движения в частных производных гиперболического типа с учетом изменения нагрузки в местах крепления оптического кабеля или троса. Если при сейсмическом воздействии волновая нагрузка возбуждает колебания по крайней мере на одном из концов кабеля как циклическое гармоническое наложенное смещение граничного условия, то уравнение движения может быть получено с учетом установившегося динамического равновесия, используя принцип Д'Аламбера [2].

Предлагаемый спектральный подход может быть легко реализован в коде Python и гораздо менее требователен, чем полный нелинейный динамический анализ [3]. Этот подход может быть распространён и на другие приложения, включающие слабо нелинейные структуры – кабельные линии, подверженные землетрясениям и динамическим ветровым воздействиям.

#### Список литературы

1. **S. Ali GhafariOskoci, Ghyslaine McClure.** A novel approach to evaluate the equivalent dynamic stiffness of guy clusters in telecommunication masts underground excitation // Engineering Structures. 2011. Vol. 33.
2. **Маневич Л.И., Гендельман О.В.** Аналитически разрешимые модели механики твердого тела. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2016.
3. **Ланда П.С.** Нелинейные колебания и волны. М: ЛИБРОКОМ, 2019.

# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В РЕЖИМЕ ЛЕВИТАЦИИ

*Котин К.С., Кувалдин А.Б.*

*Москва, ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»*

Индукционный метод нагрева и плавки металлов, пройдя более чем столетний путь развития, зарекомендовал себя как наиболее эффективный способ бесконтактного подвода тепла в электропроводящую среду. Индукционная плавка приобрела исключительно широкое распространение как по числу действующих установок, так и по разнообразию технологических применений в самых разных областях техники.

Есть технологические процессы, которые не требуют полного расплавления заготовки, но возникает необходимость равномерного её нагрева.

Помимо равномерного нанесения покрытия, одновременный нагрев детали вместе с её подъёмом повышает адгезию материалов и позволяет лучше закрепить покрытие на обрабатываемом элементе.

Таким образом, возникает задача нагрева детали, в данном случае, плоской пластины, которую впоследствии можно подвергнуть другому виду механической обработки, например, штамповке.

Для удержания образца расплава в электромагнитном тигле необходимо соблюдение нескольких условий:

– определение формы индуктора. Опытным путем показано, что форма индуктора может сильно зависеть от формы заготовки. В случае пластины наиболее рациональным являются рекомендации. [1 – 4];

– определение энергетических параметров установки. В системе индуктор-загрузка следует учитывать направление тока в витках индуктора для обеспечения картины поля, необходимой для удержания детали [5].

Исследованиями нагрева металлов во взвешенном состоянии занимались и занимаются как российские ученые, так и ряд иностранных специалистов. Основным российским исследователем является Фогель А.А, описавший ряд физических закономерностей и выделивший концепции конструкции индукторов. Также проблемой занимаются

иностранные авторы [6,7].

В качестве поверхности, подвергаемой обработке во взвешенном состоянии можно рассматривать пластины материала и длинные ленты металла.

В работе в качестве детали для обработки принята пластина алюминия. Конструктивно индуктор представляет собой набор индуцирующих проводов прямоугольного сечения, расположенных параллельно. В целом при математическом и машинном моделировании обозначенная выше задача может быть свободно представлена в форме плоско-параллельной задачи (рис. 1).

Простейшим случаем электромагнитного тигля можно считать систему индуктор-загрузка, где простой одновитковый индуктор служит источником электромагнитного поля.

Представленная схема обладает следующими характеристиками:  $a$  – ширина витка = 6 мм;  $b$  – высота витка = 8 мм;  $A$  – ширина пластины = 50 мм;  $B$  – высота пластины = 2 мм;  $x_1$  – расстояние от оси  $O_y$  до середины витка 12 мм;  $y_1$  – расстояние от оси  $O_x$  до середины витка 12 мм.

Условие равновесия пластины в электромагнитном поле для этого случая:

$$F_{\text{эм}} = G$$

где

$F_{\text{эм}}$  – электромагнитная сила, развиваемая индуктором;

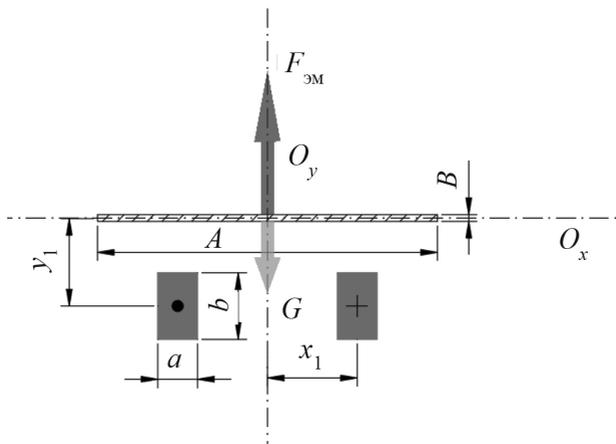


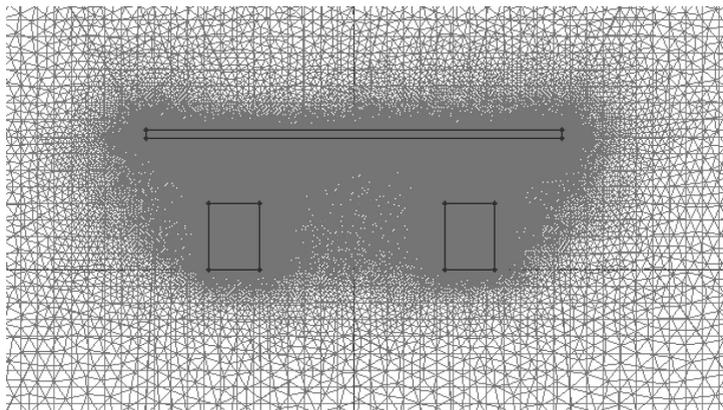
Рис. 1. Схема задачи с одновитковым индуктором

$G$  – сила тяжести, действующая на пластину.

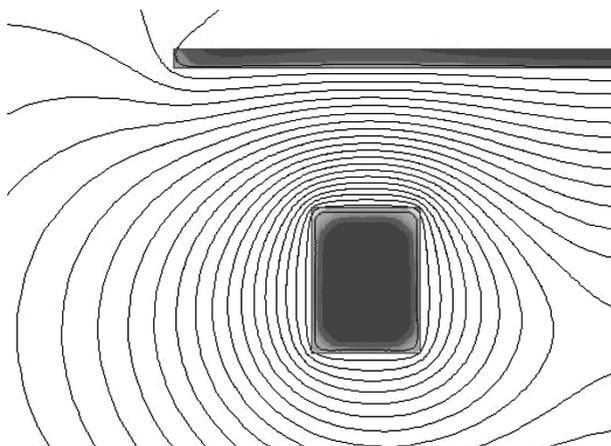
Индуктор был смоделирован в программном комплексе ELCUT (рис. 2), картина поля представлена на рис. 3.

Геометрические параметры модели описаны выше, частота моделирования составила от 22 до 60 кГц, действующее значение тока в индукторе – 5000 А. Материал индуктора – медь, материал загрузки – алюминий.

Из результатов моделирования следует, что концепция электромагнитного тигля может быть реализована на практике.



**Рис. 2.** Геометрия простой системы



**Рис. 3.** Картина поля в простом индукторе

Согласно графикам, наибольшая плотность энергии в пластине наблюдается при частоте 60 кГц, ее значение составляет  $1200 \text{ Дж/м}^3$ .

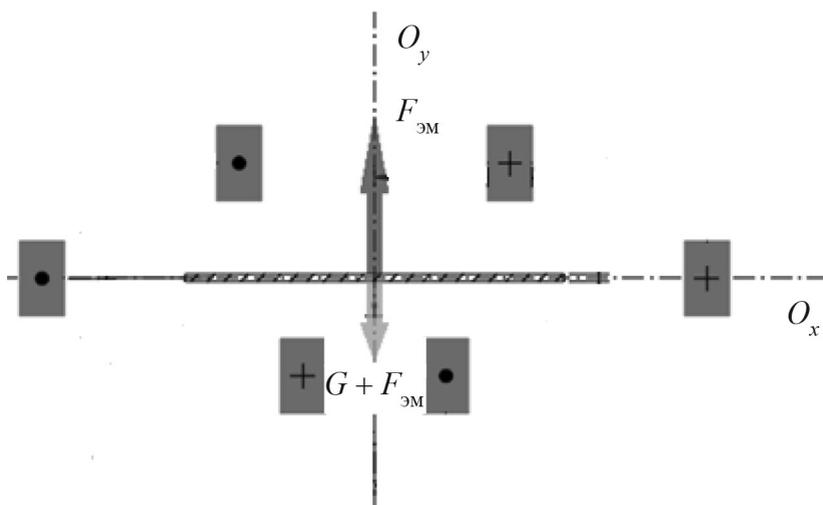
Наименьшее значение наблюдается при частоте 22 кГц и составляет  $890 \text{ Дж/м}^3$ , наибольший нагрев наблюдается в нижней части при тепловыделении  $4032 \text{ Вт/м}^3$ , наименьший – в верхней при тепловыделении  $101,5 \text{ Вт/м}^3$ .

Электромагнитная сила, действующая на пластину составила  $86,75 \text{ Н/м}^2$ .

Согласно расчетам для подъема пластины необходимо развить силу, превышающую  $26,5 \text{ Н/м}^2$ , что позволяет говорить о том, что подобная конструкция возможна.

Следует отметить, что при рассмотрении результатов был выявлен ряд существенных конструктивных недочетов, таких как выход заготовки за пределы электромагнитного тигля, недостаточное тепловыделение в верхней части заготовки ввиду отсутствия источников нагрева сверху, недостаточный боковой нагрев заготовки.

Таким образом, учитывая полученные результаты, более рациональным представляется применение многовиткового индуктора более сложной конфигурации (рис. 4).



**Рис. 4.** Схема индуктора со стабилизирующим и закрывающим витками

## Список литературы

1. **Фогель А.А.** Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л.: Машиностроение, 1979.
2. **Кувалдин А.Б., Федин М.А.** Теория индукционного нагрева. М.: НИУ «МЭИ», 2018.
3. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи. М., 1967; Теплотехника металлургического производства. М., 2002. Т. 1: Теоретические основы. Т. 2: Конструкции и работа печей; Индукционные тигельные печи. 2-е изд. Екатеринбург, 2002.
4. **Маринкова Е.И., Борисов А.Ю., Шабурова А.А., Фризен В.Э.** Левитационная плавка в конусном высокочастотном индукторе с обратным витком / Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров. Материалы научно- практич. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2016.
5. **Ячиков И.М., Вдовин К.М., Шмелев М.О.** Моделирование поведения магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. № 1.
6. **Peşteanu O., Baake E.** Beitrag zur numerischen und experimentellen Untersuchung der elektromagnetischen Levitation flüssiger Metalle // Workshop Electro-technic. 2011.
7. **Kermanpur A., Jafari M., Vaghayenegar M.** Electromagnetic-thermal coupled simulation of levitation melting of metals // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211. № 2.

# РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРА СКОТТА

*Федин М.А., Молостова А.В.*

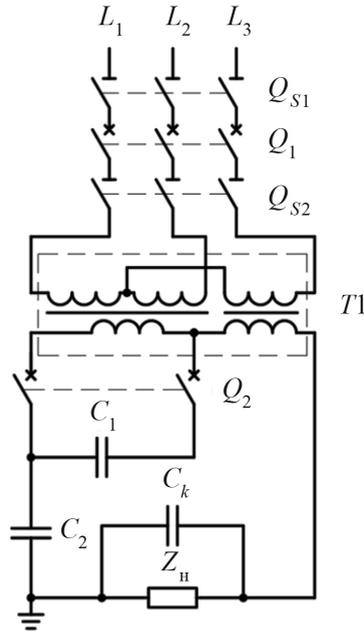
*Москва, НИУ «МЭИ»*

Развитие нефтедобычи на территории Российской Федерации в районах с суровыми климатическими условиям обусловило значительный рост электрических нагрузок систем электрообогрева. Ввод новых и модернизация инфраструктуры старых нефтегазовых месторождений обязывает обеспечивать устойчивость температуры нефти и газа по ходу переработки, транспортировки и хранения. Сложность в реализации задачи – наличие достаточно протяженных теплоизолированных магистральных трубопроводов.

Индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН), основанные на использовании поверхностного эффекта и эффекта близости в электрических проводниках переменного тока, наиболее оптимизированы под задачи электрообогрева протяженных трубопроводов.

Современные ИРСН, как правило, являются однофазными нагрузками, мощности которых могут достигать сотен киловатт. Поэтому возникает необходимость разработки схем электропитания ИРСН, которые позволяют согласовывать первичную трехфазную сеть с однофазной нагрузкой. В целях уменьшения несимметрии тока однофазной промышленной нагрузки большой мощности часто используются специальные симметрирующие электротехнические комплексы, в том числе выполненные на основе специальных трансформаторов.

Результаты сравнения современных схем электроснабжения для ИРСН показывают, что в качестве источника питания для них весьма целесообразно использование специального симметрирующего трансформатора, спроектированного на основе схемы трансформатора Скотта (рис. 1).



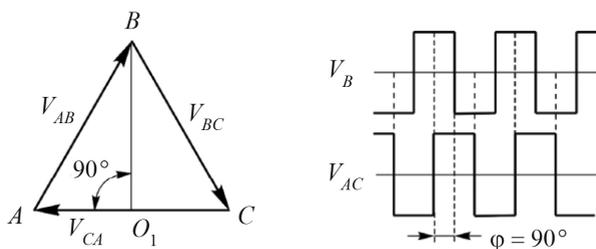
**Рис. 1.** Схема электроснабжения с применением трансформатора Скотта

Принцип действия трансформатора Скотта заключается в использовании симметричных схем, которые позволяют получать одинаковые показатели из-за расположения и числа витков во вторичной и первичной обмотке. Для образования выходной трехфазной системы напряжений при равенстве входных напряжений на первичных обмотках трансформаторов необходимо соблюдение следующих соотношений витков их обмоток (рис. 2):

$$w_{AO1} = w_{O1C}, \quad w_{BO1} = \frac{\sqrt{3}}{2} (w_{AO1} + w_{O1C}).$$

Электроэнергия на входе системы трансформаторов Скотта имеет два независимых параметра – входны напряжения и угол фазового сдвига между ними. Управляя этими параметрами, можно осуществлять стабилизацию выходных фазных напряжений.

Для расчета параметров и дальнейшего проектирования системы электроснабжения было проведено исследование электрических и энергетических характеристик ИРСН различной длины, мощности,



**Рис. 2.** Формирование трехфазной системы напряжений схемой Скотта

с различными размерами прямого и обратного проводников и т.д. На рис. 3 в качестве примера приведены расчетные характеристики ИРСН в программе, разработанной авторами, а также определены параметры специального симметрирующего трансформатора (количество и способ соединения обмоток, числа витков и коэффициенты трансформации, значения компенсирующих и фазосдвигающих емкостей и т.д.) для ИРСН-систем в широком диапазоне изменения мощности и длины участка электрообогрева. Результаты исследования подтвердили возможность использования в качестве источника питания трансформаторную схему Скотта.

С использованием программного пакета MATLAB/Simulink была разработана математическая модель схемы электроснабжения для однофазной ИРСН с применением трансформаторной схемы Скотта.

Настройка симметрирующего устройства при однофазной нагрузке производится после завершения работ по монтажу и испытанию ИРСН. Перед включением питающего трехфазного напряжения необходимо проверить чередование фаз.

При подаче питающего напряжения по амперметрам питающих фаз контролируется равенство значений токов. Если значения токов в фазах не равны, то требуется настройка устройства, то есть корректировка емкостей конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Для этого измеряются напряжение  $U_n$  и ток нагрузки  $I_n$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$ . Емкости  $C_1$  и  $C_2$  представляют собой конденсаторные батареи, состоящие из некоторого количества конденсаторов, что позволяет корректировать емкость каждой батареи при наладке системы обогрева на объекте.

Подставляя измеренные или рассчитанные в программе значения  $U_n$ ,  $I_n$  и  $\cos\varphi$ , находим фактические значения активного сопротивления

**Исходные данные**

Площадь поперечного сечения проводника, мм <sup>2</sup>	15
Наружный диаметр трубы, мм	25
Толщина стенки трубы, мм	3
Удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·м	1,93e-8
Удельное электрическое сопротивление трубы, Ом·м	1,66e-7
Частота тока, Гц	50
Ток индуктора, А	65,43
Число слоев, на которые разделяется стенка трубы	50
Задание $\mu(H)$ вручную <input type="checkbox"/>	

100%

Число итераций 3

**Результаты расчета**

Напряжение на поверхности трубы (на 1 м длины), В/м	0,008
Активная мощность в трубе (на 1 м длины), Вт/м	15,570
Активная мощность в индукторе (на 1 м длины), Вт/м	5,508
Суммарная активная мощность (на 1 м длины), Вт/м	21,079
Реактивная мощность в индукторе (на 1 м длины), ВАр/м	0,000
Реактивная мощность в трубе (на 1 м длины), ВАр/м	12,118
Реактивная мощность в зазоре (на 1 м длины), ВАр/м	0,395
Реактивная мощность снаружи трубы (на 1 м длины), ВАр/м	0,001
Суммарная реактивная мощность (на 1 м длины), ВАр/м	12,514
Полная мощность системы (на 1 м длины), ВА/м	24,514
cos phi	0,860
Напряжение на индукторе (на 1 м длины), В/м	0,375
Условный электрический КПД	0,739

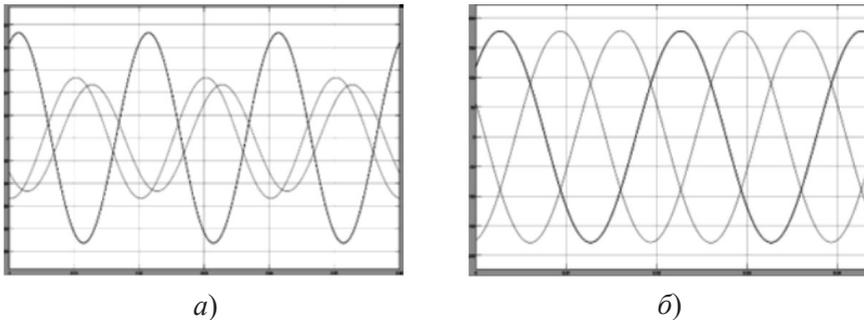
Рис. 3. Результаты расчета ИРСН

$R$  и индуктивность  $L$  нагрузки:

$$R_n = \frac{U_n \cos\varphi}{I_n};$$
$$L_n = \frac{\frac{U_n}{I_n} \sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{2\pi f}.$$

В разработанную модель в программе MATLAB/Simulink подставляются вычисленные значения  $R_n$  и  $L_n$ . Корректируя значения емкости конденсатора  $C_n$ , выравнивают падения напряжения на конденсаторе  $U_{Cn}$  и индуктивности нагрузки. Подбором емкости конденсатора  $C_n$  выравнивают токи на выходных выводах трансформатора и питающих фазах (рис. 4).

Полученные значения емкости конденсаторов  $C_n$  и устанавливаются на симметрирующем устройстве.



**Рис. 4.** Временные диаграммы фазных токов ИРСН без симметрирования (а) и с использованием симметрирующего трансформатора на основе схемы Скотта (б)

### Вывод

Разработанная модель источника питания с использованием специального симметрирующего трансформатора, спроектированного на основе схемы трансформатора Скотта, позволяет симметрировать токи в питающей сети с высокой точностью. Трансформатор обеспечивает на выходе форму напряжения близкую к синусоидальной.

### Список литературы

1. Хренков Н.Н., Струпинский М.Л., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. Инфра-Инженерия, 2015.

2. **Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А.** Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве // Индукционный нагрев. 2010. № 13.

3. **Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А.** Сравнение индукционных и резистивных систем электрообогрева промышленных трубопроводов / Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ – 2014. Сборник научных трудов. Екатеринбург, 2014.

4. **Патент RU 2290740.** Устройство питания для двухфазных индукционно-резистивных нагрузок, обеспечивающее симметрию первичной трехфазной цепи / Струпинский М.Л., Есехин В.М. // БИ. 2006. №12.

5. **Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Шатов В.А.** Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах // Электричество. 2005. № 11.

6. **Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А.** Расчет электрических и энергетических характеристик стержневого индуктора для нагрева ферромагнитной загрузки // Электричество. 2009. № 10.

7. **Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А.** Расчет и внедрение индукционно-резистивной системы обогрева трубопроводов / Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий 2011. Екатеринбург, 2011.

# ОЦЕНКА ПОТЕРЬ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В МАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ОСЕВОГО ПОТОКА

*Филиппов Д.М., Шуйский А.А.*

*ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»*

Математическое моделирование распределения вихревых токов в проводящих телах различной формы имеет широкий спектр практических применений. Для прикладных задач математическая модель требует применения численных методов.

Метод конечных элементов [1] является самым распространённым численным методом решения граничных задач электродинамики. Ключевой недостаток этого метода заключается в том, что расчётная область включает в себя пустое пространство, окружающее проводящее тело, что отражается на объёме вычислений. Если расчётная область содержит малые воздушные зазоры, эта проблема становится существенной. В [2] представлен метод, в котором вводится специальная расчётная сетка, позволяющая избежать ключевой проблемы метода конечных элементов. Однако такой приём неприменим в случае произвольной геометрии.

Среди методов численного моделирования полевых задач известен также метод вторичных источников [3]. Метод заключается в решении интегральных (или интегро-дифференциальных) уравнений относительно плотности вторичных источников. Преимущество этого метода по отношению к методу конечных элементов заключается в том, что дискретизации подвергаются только исследуемые проводящие тела. В соответствии с вышесказанным, в настоящей работе разработана математическая модель электромагнитного поля вихревых токов на основе метода вторичных источников.

В [3] была описана численная модель решения системы интегро-дифференциальных уравнений относительно плотности вторичных источников, возникающих в объемах и на поверхностях проводников под действием квазистационарного электромагнитного поля переменных токов или перемещающихся постоянных магнитов. Такой численный метод широко известен под названием метода коллокаций;

метод заключается в замене плотностей вторичных источников на кусочно-постоянную функцию, точка наблюдения фиксируется в пределах элемента разбиения. Как правило, точки коллокаций фиксируются в центрах элементов разбиения. Этот подход не всегда оптимален по вычислительной эффективности. Однако математически строгого метода, позволяющего найти оптимальные позиции точек коллокаций, на настоящий момент не разработано.

На практике при решении задач со сложной геометрией расчётной области метод коллокаций приводит к неоправданному росту числа разбиений. Этот факт связан с неоптимальным расположением точек коллокаций; в этом заключается главный недостаток метода.

В работе предлагается новый метод, позволяющий избежать проблемы выбора точек коллокаций, обладающий повышенной вычислительной эффективностью.

Приведём систему линейных алгебраических уравнений относительно вихревых токов и поверхностных зарядов [4]. Система решается методом последовательных приближений:

$$\bar{\delta}_{k,i} = -\frac{\gamma\mu_0}{4\pi} \sum_{m=1}^{N_V} \frac{\partial \bar{\delta}_{m,i}}{\partial t} \int_{\Delta V_m} \frac{dV_N}{r_{MN}} + \frac{\gamma}{4\pi\epsilon_0} \sum_{m=1}^{N_S} \sigma_{m,i} \int_{\Delta S_m} \frac{\bar{r}_{PM}}{r_{PM}^3} dS_p - \frac{\gamma \partial \bar{A}_0(M_k, t_i)}{\partial t}, \quad k=1,2,\dots,N_V, \quad i=1,2,\dots,N_T; \quad (1)$$

$$\sigma_{k,i} - \frac{1}{2\pi\Delta S_k} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{N_S} \sigma_{j,i} \int_{\Delta S_k} \int_{\Delta S_j} \frac{(\bar{r}_{PQ}, \bar{n}_Q)}{r_{PQ}^3} dS_p dS_Q = -\frac{\epsilon_0\mu_0}{2\pi\Delta S_k} \sum_{m=1}^{N_V} \frac{\partial \bar{\delta}_{m,i}}{\partial t} \bar{n}_Q \int_{\Delta S_k} \int_{\Delta V_m} \frac{dV_N dS_Q}{r_{QN}} - \quad (2)$$

$$-\frac{2\epsilon_0}{\Delta S_k} \int_{\Delta S_k} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{A}_0(Q, t_i), \bar{n}_Q) dS_Q, \quad k=1,2,\dots,N_S, \quad i=1,2,\dots,N_T;$$

$$\sum_{k=1}^{N_S} \sigma_{k,i} \Delta S_k = q(t_i), \quad i=1,2,\dots,N_T, \quad (3)$$

где  $\bar{\sigma}_{k,i}^{(s)}$  – коэффициент кусочно-постоянной аппроксимации плотности

вихревого тока, распределенного в объеме  $V$  проводника;  $\sigma k, i$  – коэффициент кусочно-постоянной аппроксимации плотности поверхностного электрического заряда, распределенного по поверхности  $S$  проводника;  $\gamma$  – удельная проводимость образца;  $N_S$  и  $N_V$  – число элементов поверхности и объема, соответственно;  $N_T$  – число моментов времени;  $\vec{A}_0$  – векторный потенциал поля свободных источников.

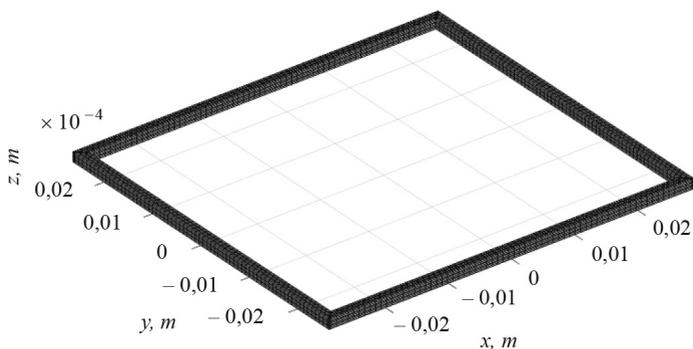
Уравнение (1) совпадает с исходным уравнением метода коллокаций. Уравнение (2) получено с помощью граничного условия, записанного в интегральной форме для замкнутых поверхностей, охватывающих элементы дискретизации границы расчётной области, в отличие от соответствующего уравнения метода коллокаций, которое получено из граничного условия, записанного в точке. Следовательно, проблема точек коллокаций для нового метода не возникает [4].

Можно показать, что матрица уравнения (2) является вырожденной, поэтому предлагается заменить одно из уравнений вида (2) на соотношение (3), чтобы получить невырожденную матрицу.

Разработанный метод имеет сходство с методом Галеркина, уравнения которого с формальной точки зрения также выражаются через кратные интегралы. Однако описываемый метод является независимым и более общим, например, он может быть обобщен на другие типы вторичных источников, таких, как двойной слой фиктивных магнитных зарядов. В этом случае интегральное граничное условие выражается через закон полного тока и полученная система линейных алгебраических уравнений будет существенно отличаться от применения метода Галеркина. Метод Галеркина является математическим приёмом, не дающим ясности и объяснения эффективности. Рассматриваемый же метод даёт большую степень ясности, так как объясняет численные результаты с точки зрения применения граничного условия в интегральной форме, в отличие от граничного условия, сформулированного локально [4].

Электрическая машина осевого потока с безжелезным статором [5] характеризуется отсутствием потерь в роторе, а также незначительными потерями в проводе обмотки статора. Для простоты расчёта целесообразно заменить цилиндрический двигатель на линейный. Таким образом, расчётная модель представляет собой обмоточный провод, представленный в виде протяжённого тела, и цепочку перемещающихся магнитов.

На рисунке приведён пример расчётной сетки проводников для за-



Сетка дискретизации объема проводников

дачи расчёта потерь в магнитной системе электрической машины осевого потока.

Расчётная область, представленная на рисунке, является набором девяти проводников – центрального и восьми проводников вокруг него. Эти восемь проводников позволяют эффективно оценить потери в центральном проводнике. При этом расчёт потерь на вихревые токи (тепловая мощность вихревых токов, усреднённая по временному периоду  $T$ ) вычисляется по формуле:

$$P = \frac{1}{T} \int_T \int_V \bar{\delta}(M, t) \bar{E}(M, t) dV_M dt. \quad (4)$$

## Выводы

Предложена математическая модель электромагнитного поля вихревых токов на основе метода вторичных источников, отличающаяся вычислительной эффективностью. Граничное уравнение в рамках такой модели получено исходя из граничного условия в интегральной форме. Таким образом, устраняется проблема произвольности выбора точек коллокаций.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-08-00962.*

## Список литературы

1. **Kuczmann M.** Numerical analysis of eddy current field in laminated media // Pollack Periodica. 2018. Vol. 13. № 2.

2. **Nagel J.R.** Fast finite-difference calculation of eddy currents in thin metal sheets // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2018. Vol. 33. № 6.

3. **Filippov D.M., Kozik G.P., Fursenko A.V., Fedorovsky V.N.** The secondary sources method analysis and experimental modeling of the permanent magnet eddy currents suspension / Proc. of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016.

4. **Filippov D.M., Shuyskyy A.A.** Improving efficiency of the secondary sources method for modeling of the three-dimensional electromagnetic field // Progress in Electromagnetics Research. 2019. Vol. 78.

5. **Filippov D.M., Shuyskyy A.A., Kazak A.N.** Numerical and Experimental Analysis of an Axial Flux Electric Machine / 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020.

## РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕТОК РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Пономаренко В.И., Лагунов И.М.*

*ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»*

Проводящие диполи и резистивные пленки традиционно применяются в радиопоглощающих материалах (РПМ). Так, композитные материалы на основе диполей обладают дисперсией эффективной диэлектрической проницаемости (ЭДП), которую можно варьировать в широких пределах изменением длины диполей, их концентрации и других параметров. Расчет ЭДП таких композитов проводится обычно приближенно, например, методом усредненного поля, и содержит различные допущения, что затрудняет расчетную оптимизацию ЭДП.

Известна радиопоглощающая структура, содержащая сплошные радиопоглощающие пленки, разделенные диэлектрическими слоями. Расчет частотной зависимости коэффициента отражения (КО) от такой структуры не представляет сложностей. Поверхностные сопротивления

ния пленок и другие параметры определяются на основе решения задачи оптимизации с целью получения минимального уровня отражения при заданной толщине структуры в рабочем диапазоне частот.

Резистивной пленке можно придать емкостную компоненту поверхностного сопротивления, если разделить ее на элементы, например, полосы или квадраты. Применение такой резистивно-емкостной пленки (РЕП) в радиопоглощающих структурах (РПС) позволяет улучшить их характеристики.

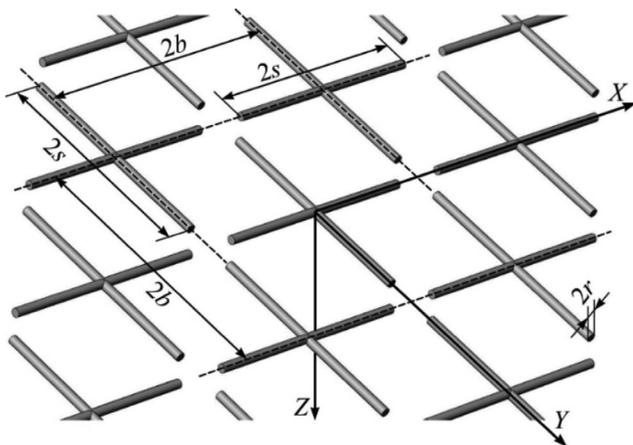
В Крымском федеральном университете им. В.И. Вернадского, в Физико-техническом институте на кафедре Экспериментальной физики разработан точный численный метод расчета ЭДП композитов на основе решеток резистивных элементов и радиопоглощающих структур, состоящих из таких решеток [1]. Метод основан на разбиении резистивных элементов на малые части и решении задачи возбуждения канала Флоке токами, наведенными полем падающей волны и вторичными полями.

Сам метод расчета и некоторые результаты, относящиеся к радиопоглощающим структурам на основе резистивных элементов и к композиционным материалам из таких элементов, рассматривался в ряде работ авторов. Метод был применен также к расчету ЭДП композиционных материалов с резистивными элементами различной формы и РПС на основе таких материалов.

В качестве примеров рассмотрим поляризационно независимые структуры, состоящие из решеток скрещенных резистивных диполей и резистивных квадратов. В обоих случаях плоская электромагнитная волна длины  $\lambda$ , поляризованная вдоль оси  $Y$ , падает на структуру нормально в направлении оси  $Z$ .

**Расчет эффективной диэлектрической проницаемости** рассмотрим на структуре, состоящей из одинаковых плоских решеток скрещенных диполей [2] (рис. 1). Периоды решетки по осям  $X$ ,  $Y$  одинаковы и равны  $2b$ , длина диполя равна  $2s$ , радиус  $r$ , проводимость  $\sigma$ . Решетки расположены одна над другой и находятся в слое диэлектрика толщиной  $d$  с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ ; слой размещен на отражающей плоскости либо на полупространстве с такой же диэлектрической проницаемостью.

С учетом периодичности и симметрии структуры, а также поляризации падающей волны, задача дифракции сводится к решению задачи рассеяния в эквивалентном волноводе – канале Флоке, стенки  $y = 0, b$



**Рис. 1.** Решетка скрещенных резистивных диполей

которого являются электрическими, а стенки  $x = 0$ ,  $b$  – магнитными. Координаты решеток  $z_n = h/2 + (n - 1)h$ ,  $n = 1, 2, \dots, k$  где  $k$  – число решеток,  $h = d/k$ . Плоскости симметрии решетки  $x = 0$ ,  $b$  и  $y = 0$ ,  $b$  «разрезают» диполи на полуцилиндры.

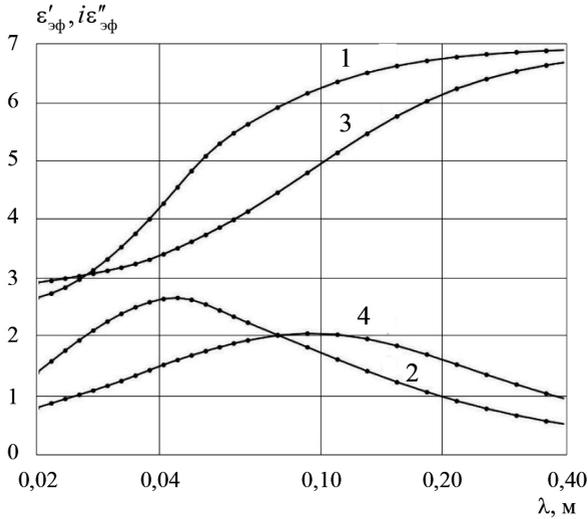
ЭДП структуры вычисляется по значениям комплексного коэффициента отражения при ее расположении на электрическом и магнитном зеркалах.

На рис. 2 показано влияние проводимости диполей на дисперсию ЭДП такой структуры с параметрами  $b = 5$  мм,  $x = 0$  мм,  $s = 4,5$  мм,  $r = 5$  мкм,  $\epsilon = 3$ . Видно, что уменьшение проводимости вдвое привело к уменьшению компонент ЭДП и увеличению резонансной длины волны РДВ (при которой максимальна мнимая часть ЭДП).

Характер дисперсии ЭДП структуры, как следует из рис. 2, можно охарактеризовать как релаксационный, что согласуется с результатами, полученными путем приближенных оценок. На рис. 2  $\epsilon_{\text{эф}} = \epsilon'_{\text{эф}} + i\epsilon''_{\text{эф}}$  – ЭДП однородного слоя, сопоставленного данной многослойной структуре,  $i$  – мнимая единица.

**Оптимизацию параметров РПМ** рассмотрим на примере радиопоглощающей структуры на основе плоских решеток резистивных квадратов [3], расположенных в недиспергирующем диэлектрическом слое, лежащем на металлическом зеркале.

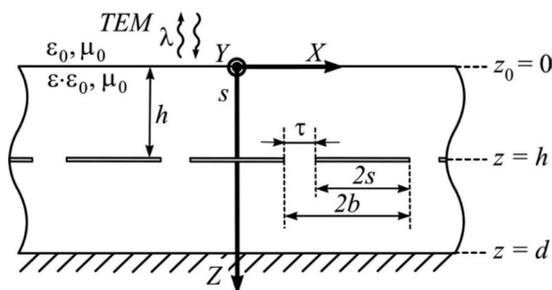
При решении задачи оптимизации частотной зависимости коэффициента отражения критерием  $Kr$  эффективности радиопоглощающей



**Рис. 2.** Влияние проводимости диполей на дисперсию ЭДП: 1, 2 –  $\epsilon'_{эф}, \epsilon''_{эф}$ , при  $\sigma = 10^5$  См/м; 3, 4 –  $\epsilon'_{эф}, \epsilon''_{эф}$ , при  $\sigma = 5 \cdot 10^5$  См/м

структуры являлся минимум максимального значения коэффициента отражения по мощности в расчетном диапазоне длин волн. При фиксированной толщине структуры оптимизировались все прочие параметры: поверхностное сопротивление квадратов; вещественная диэлектрическая проницаемость слоя, в котором расположены решетки; сторона квадрата и зазор между соседними квадратами; расстояния решеток от границы диэлектрического слоя. Для нахождения минимума критерия применялся метод координатного спуска с уменьшением шага при приближении к минимуму и различными начальными значениями параметров оптимизации. Для сравнения проводилась оптимизация аналоговой структуры (АС) на основе сплошных резистивных пленок.

Структура с одной решеткой изображена на рис. 3. Квадраты со стороной  $2s$  и поверхностным сопротивлением  $\rho$ , разделенные зазорами шириной  $\tau$  в направлениях осей  $X, Y$ , расположены в немагнитном слое толщиной  $d$  с вещественной относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  на расстоянии  $h$  от границы слоя со свободным пространством с абсолютной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_0$  и абсолютной магнитной проницаемостью  $\mu_0$ . Падающая на структуру в направлении

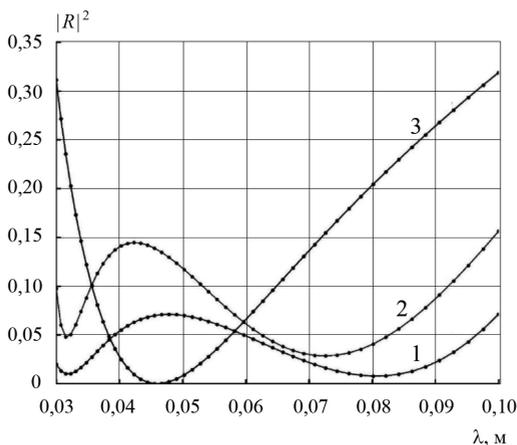


**Рис. 3.** Двоякопериодическая радиопоглощающая структура на основе резистивных квадратов

оси  $Z$  плоская электромагнитная волна длиной  $\lambda \geq 2b$  поляризована по оси  $Y$ . Металлическое зеркало находится в плоскости  $z = d$ .

На рис. 4, кривая 1 показана оптимальная зависимость от длины волны КО по мощности для исследуемой структуры (ИС) при  $d = 1$  см; кривая 2 соответствует оптимизированной АС при той же толщине,  $d = 1$  см. Для сравнения на кривой 3 показана зависимость КО от длины волны для АС той же толщины, но согласованной на длине волны  $\lambda_0 = 4,6$  см; радиопоглощающая структура более эффективна, чем АС.

Как показали расчеты, даже небольшое увеличение толщины структуры приводит к существенному уменьшению критерия эффективности  $Kr$ .



**Рис. 4.** Зависимости коэффициента отражения по мощности от длины волны при  $d = 1$  см для оптимизированной ИС (1), оптимизированной АС (2) и АС, согласованной на длине волны  $\lambda_0 = 4,6$  см (3),  $\varepsilon = 4$

Для оценки влияния отклонения параметров структуры от оптимальных значений были проведены расчеты, в которых все оптимальные параметры были увеличены на 5 %, а затем на столько же уменьшены. При этом увеличение критерия эффективности составило не более 0,02.

На основе точных расчетов имеется возможность варьирования в широких пределах эффективной диэлектрической проницаемости радиопоглощающих материалов на основе резистивных элементов, что делает такие материалы перспективными для применения в радиопоглощающих структурах.

Необходимо отметить, что радиопоглощающие структуры на основе квадратных резистивных элементов являются существенно более эффективными по сравнению со структурами, содержащими сплошные резистивные пленки. В частности, структура на основе двух решеток резистивных квадратов толщиной, равной единице длины, обеспечивает КО по мощности менее 10 % в диапазоне длин волн 2 – 12 единиц длины, что ранее не было достигнуто на немагнитных радиопоглощающих структурах такой же толщины.

Выполняемые расчеты для СВЧ диапазона переносятся на другие диапазоны длин волн простым масштабированием линейных размеров структур.

### Список литературы

1. **Пономаренко В.И., Лагунов И.М.** Поглотители электромагнитных волн. Радиофизическая теория. Методы расчета. Симферополь: ПОЛИПРИНТ, 2021.
2. **Lagunov I.M., Ponomarenko V.I.** An Artificial Dielectric Based on Conducting Dipoles // Journal of Communications Technology and Electronics. 2020. Vol. 65. №. 3.
3. **Пономаренко В.И., Лагунов И.М.** Радиопоглощающая структура на основе резистивных квадратов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 6.

# ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВОДООХЛАЖДАЕМОГО СВОДА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА КАЛЬЦИЯ НА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Золотарев В.В., Алиферов А.И., Сериков В.А.*

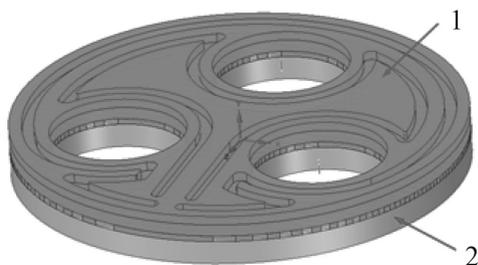
*Новосибирский Государственный Технический Университет*

Одним из способов получения раскислителя на основе карбида кальция является его получение в дуговой электропечи с открытой дугой. Проблема использования таких печей заключается в высоких тепловых нагрузках и повышенной химической активности кальция внутри рабочего пространства печи. В связи с этим представляется возможным использовать футеровочные материалы только на основе периклаза. Однако такая футеровка отличается малым количеством теплосмен и имеет в своём составе связующее на основе оксида кремния, который восстанавливается кальцием из рабочего пространства.

Решением этой проблемы может стать водоохлаждаемый свод с торкрет-массой на основе периклаза со стороны, обращённой в рабочее пространство. Однако общепринятая конструкция свода в виде змеевика [1] из сваренных между собой труб представляет серьёзную опасность из-за сварных швов, которые в основном являются местом протечки змеевика в процессе эксплуатации. Попадание воды в рабочее пространство с карбидом кальция вызовет активную реакцию гидролиза карбида и последующий за этим взрыв ацетилена. Поэтому критически важно избежать попадания воды в рабочее пространство с карбидом кальция.

Так как центральная часть свода воспринимает самые большие тепловые нагрузки, было принято решение использовать свод с центральной водоохлаждаемой секцией из монолитной стальной плиты с фрезерованными в ней каналами водоохлаждения.

Конструкция центральной секции представляет из себя металлическую плиту толщиной 80 мм и диаметром 1500 мм и слой торкрет-массы толщиной 80 мм (рис. 1). В плите выполнены три отверстия для электродов, водоохлаждаемые каналы, которые заварены накладками с наружной поверхности, и пазы для лучшего зацепления торкрет-массы.

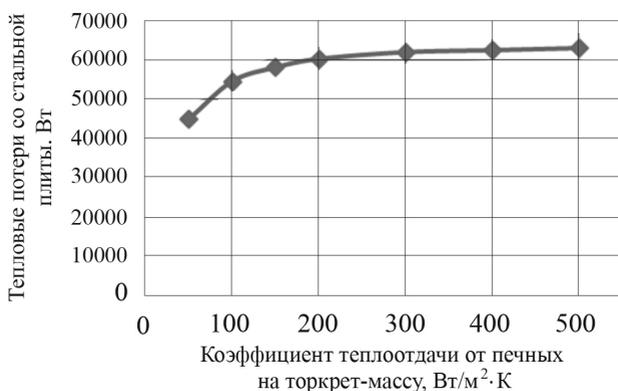


**Рис 1.** Центральная водоохлаждаемая секция свода:  
1 – металлическая плита; 2 – торкрет-масса.

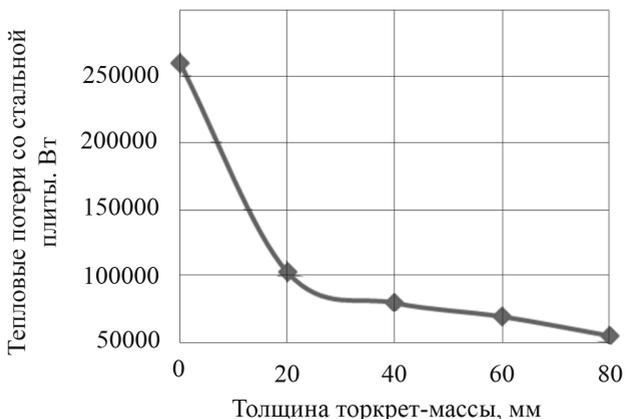
Для решения тепловой задачи была создана трехмерная модель в пакете ANSYS [2]. В рамках этой задачи исследовалось влияние различных материалов металлической плиты, формы водоохлаждаемых каналов, и торкрет-массы и переменных граничных условий.

Основной целью расчётов являлось получить конструкции водоохлаждаемой плиты, которая выдержит тепловую нагрузку от рабочего пространства. Зависимости физических свойств материалов от температуры приняты по данным [3]. Для задания тепловой нагрузки использовались граничные условия третьего рода на поверхности торкрет-массы, обращенной к рабочему пространству печи и на поверхности каналов водоохлаждения [4].

На рис. 2 показана зависимость тепловых потерь от коэффициента теплоотдачи печных газов на внутреннюю поверхность торкрет-массы



**Рис. 2.** Зависимость тепловых потерь от коэффициента теплоотдачи печных газов



**Рис. 3.** Зависимость тепловых потерь от толщины торкрет-массы

при температуре печных газов  $1700^{\circ}\text{C}$ .

Из рис. 3 следует, что при уменьшении толщины торкрет-массы тепловые потери растут и при толщине торкрет-массы меньше 20 мм они резко увеличиваются.

В процессе расчётов была разработана конструкция центральной секции из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, которая выдерживает тепловые нагрузки, температура воды в каналах остаётся в допустимых значениях при своевременном ремонте торкрет-массы. Применение этой конструкции позволит избежать быстрого износа по сравнению с футерованным сводом, а также существенно снизит вероятность попадания воды в рабочее пространство печи как и при использовании классического варианта секции из сваренного змеевика.

#### Список литературы

1. **Дуговые сталеплавильные печи.** Атлас. Зинуров И. Ю., Строганов А. И., Кузнецов Л. К., Тулин Н. А., Тимофеев С. В., Лабунович О.А., Евченко Г. И., Сергеев Г. Н., «Металлургия», 1978.
2. **Денисов М.А.** Компьютерное проектирование. ANSYS : учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014.
3. **Физические величины.** Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. **Чередниченко В.С., Алиферов А.И.** Электротехнологические установки и системы. Теплопередача в электротехнологии. Новосибирск: НГТУ, 2011.

# ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

*Васильев Е.Б.<sup>1</sup>, Васильев Р.Е.<sup>2</sup>, Овчинникова И.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Москва, ОАО «ВНИИКП»*

<sup>2</sup>*Подольск, АО «Электропровод»*

Оптические кабели (ОК) уже более 10 лет применяются на атомных станциях (АЭС) в системах различного назначения. Но в большинстве случаев речь идет о применении в системах класса 4 по НП-001-15 [1], где могут использоваться кабели общепромышленного применения.

К кабельным изделиям для систем классов 1 – 3 применяется комплекс дополнительных требований, которые не предусмотрены для ОК общепромышленного применения. Учитывая запросы предприятий атомной отрасли на ОК для систем безопасности классов 2 и 3 в период с 2010 по 2014 годы ОАО «ВНИИКП» с участием ЗАО «Торговый Дом ВНИИКП» и ЗАО «Электропровод» была проведена ОКР по созданию и освоению производства пожаробезопасных и огнестойких ОК для атомных станций, в результате которой были разработаны кабели классов безопасности 2 и 3 (ОКЗнг (А)-FRHF-01, ОКСнг(А)-FRHF-01 и ОКМнг(А)-HF-01 по ТУ 16.К71-467-2014) [2, 3], которые полностью соответствовали действующему на тот момент СТО 1.1.1.01.001.0902-2013 [4] и ГОСТ 31565-2012 [5] (класс пожарной опасности П16.5.1.2.1).

В настоящее время эти ОК успешно применяются на большинстве вновь строящихся блоков АЭС как в России, так и за рубежом, а также в метрополитене и некоторых других объектах с повышенными требованиями к безопасности. Однако в настоящее время в отношении ОК для АЭС появились задачи, требующие достаточно срочного решения, которые, с одной стороны, связаны с появлением новых требований, с другой стороны, со сложившейся политической и экономической ситуацией. В докладе будут раскрыты эти задачи и показаны некоторые результаты исследований, направленных на их решение.

## **Список литературы**

1. **НП-001-15.** Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.

2. **Овчинникова И.А., Васильев Е.Б., Семенов П.А. и др.** Кабель оптический, не распространяющий горение, огнестойкий / Патент на ПМ № 153285 U1 // БИ. 2015. № 19.

3. **Овчинникова И.А., Васильев Е.Б. и др.** Кабель оптический монтажный / Патент на ПМ № 157696 U1 // 2015. № 34.

4. **СТО1.1.1.01.001.0902-2013.** Кабельные изделия для атомных электростанций.

5. **ГОСТ 31565-2012.** Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

***Высоцкий В.Е.***

*Севастополь, СевГУ*

К настоящему времени выполнен ряд исследований, направленных на создание научно-методических основ в области разработки и проектирования линейных генераторов (ЛГ) для автономных систем электропитания (СЭП). Такие генераторы перспективны для использования в качестве альтернативных источников электрической энергии низкоорбитальных космических аппаратов. В частности, проведены исследования по определению рациональных областей применения с первичным источником энергии на основе термоакустического двигателя и возможных масштабов применения в перспективных космических программах. Проведен анализ прогнозируемых преимуществ СЭП с источником электроэнергии на основе ЛГ [1].

Проведенный анализ позволил сформулировать основные требования к преобразователю акустических волн в электрическую энергию.

Линейный генератор предназначен для эксплуатации в следующих условиях:

- температура окружающей среды от 20 °С до 100 °С;
- возможность функционирования в условиях космического про-

странства – невесомости и вакуума (от 0,133 до  $0,133 \cdot 10^{-7}$  Па);

- воздействие факторов космического пространства естественного происхождения (протоны СКЛ, протоны и электроны ЕРПЗ) с уровнями, характерными для околоземных орбит;

- воздействие механических нагрузок при выведении космического аппарата (КА) на орбиту и в орбитальном полете;

- функционирование в непрерывном режиме в течение всего срока службы.

Конструкция линейного генератора должна отвечать следующим требованиям:

- надежность не менее 0,9 при сроке службы 10 лет;

- массогабаритные показатели на уровне 30 Вт/кг;

- отсутствие вибраций, шума и электромагнитного излучения;

- электромагнитная совместимость с другими узлами СЭП КА;

- отсутствие возмущающих моментов, действующих на систему управления КА;

- функционирование при охлаждении на термоплиту;

- минимальный момент инерции подвижного элемента;

- механическая частота свободных колебаний подвижной части линейного генератора должна совпадать с частотой колебаний газа в акустической трубе во всем диапазоне частот колебаний газа (50 – 350 Гц);

- опоры должны обеспечивать предельные минимально-допустимые отклонения подвижного элемента в радиальном направлении.

Опытный образец линейного генератора имеет следующие характеристики:

- выходное напряжение постоянного тока – 60 В;

- выходная мощность для оппозитного варианта – 100 Вт;

- частота перемещения подвижного элемента – 50 Гц;

- перемещение подвижного элемента – 5 мм;

- наибольшие пульсации выходного напряжения – 300 мВ;

- броски/просадки выходного напряжения при набросе/сбросе нагрузки на 50 % – не более 10 В;

- допустимая перегрузка – 1,5g.

В ходе исследований были проведены следующие работы:

- выполнены расчеты массо-энергетических показателей генератора с первичным термоакустическим двигателем;

- проработаны структура, состав и варианты конструктивного ис-

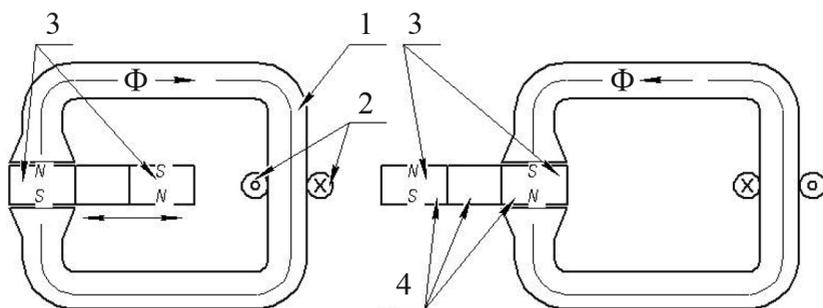
полнения линейного генератора;

– сформированы расчетная модель и выполнены расчеты основных параметров линейного генератора.

Необходимо отметить, что синхронные электрические машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами по типам конструкций активной части условно можно классифицировать на два вида: с постоянными магнитами на подвижном элементе (магнитоэлектрические ЛГ), и с постоянными магнитами на неподвижной части машины. Они называются также линейными вентильно-реактивными машинами или машинами с коммутируемым магнитным потоком – магнитокоммутационными [2, 3]. По направлению магнитного потока в стали магнитопровода относительно направления движения подвижного элемента линейные генераторы также могут быть классифицированы как машины с продольным и поперечным магнитным потоком.

В магнитоэлектрических синхронных машинах возвратно-поступательного движения изменение магнитного потока происходит благодаря входу/выходу постоянного магнита в/из воздушного зазора (рис. 1).

Постоянные магниты, расположенные на подвижном элементе ЛГ, создают электромагнитное (ЭМ) поле. При смещении подвижного элемента магнит выходит из воздушного зазора, чем обеспечивается уменьшение полезного магнитного потока. Далее (для  $2p \geq 4$ ), другой магнит с противоположным расположением магнитных полюсов входит в зазор, чем обеспечивается увеличение магнитного потока до своего максимального значения.



**Рис. 1.** Функционирование магнитоэлектрической синхронной машины с постоянными магнитами на подвижном элементе и продольным магнитным потоком (1 – магнитопровод; 2 – рабочая обмотка; 3 – магнит; 4 – подвижный элемент)

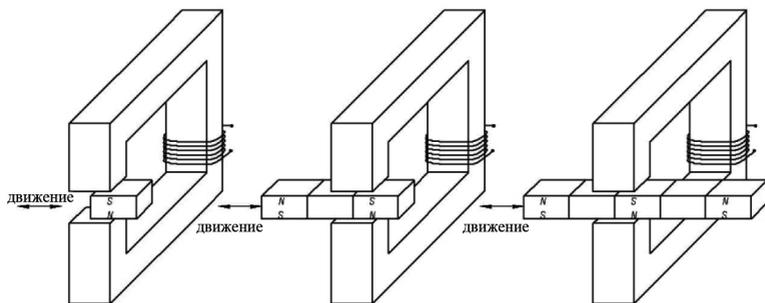
Магнитный поток пронизывает катушку снизу вверх. При дальнейшем перемещении подвижной части направление магнитного потока меняется на противоположное. В результате в соответствии с законом электромагнитной индукции на обмотках ЭМ, работающей в генераторном режиме, появляется переменное напряжение, пропорциональное скорости изменения магнитного потока.

Такие конструкции могут иметь различное число пар полюсов, начиная с  $2p = 2$  и более (рис. 2). Число пар полюсов линейного генератора с постоянными магнитами (ЛГПМ) определяется характеристиками первичного двигателя – амплитудой перемещений ( $x_m$ ) и частотой колебаний ( $f$ ).

Очевидно, что при малой амплитуде перемещений подвижной части ЛГПМ (до 10–15 мм) конструктивно сложно выполнить генератор с  $2p > 4$ . Это связано, прежде всего, с необходимостью выдержать минимальные геометрические размеры каждого магнита, и с тем, что магниты закреплены на подвижном основании и требуется обеспечить механическую прочность подвижного элемента, а также системы возбуждения. Кроме того, ЛГПМ с  $2p = 2$  имеют худшие показатели использования магнита и стали магнитопровода, так как при  $2p = 2$  не происходит изменение направления полезного магнитного потока, а только изменяется его значение.

Конструкции с магнитами на подвижном элементе ЛГ можно проектировать в многофазном исполнении, что существенно облегчает проблему сильного искажения выходного напряжения для генераторного режима.

К недостаткам конструкции синхронных ЛГ с постоянными магни-



**Рис. 2.** Магнитная цепь ЛГПМ с  $2p = 2$  (а),  $2p = 4$  (б),  $2p = 6$  (в) с поперечным магнитным потоком

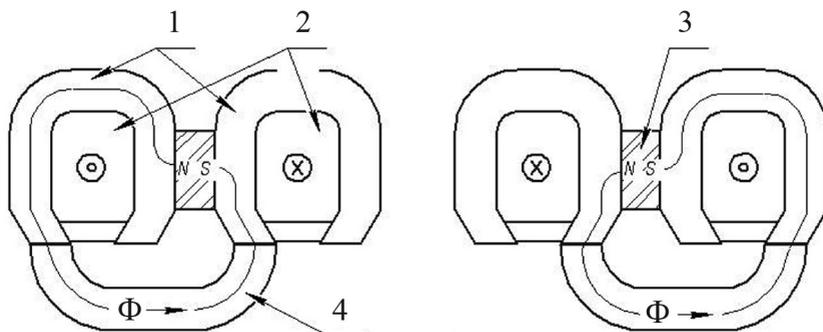
тами на подвижном элементе можно отнести и сложность крепления на нем постоянных магнитов, которые испытывают высокие динамические нагрузки, что в свою очередь, может отразиться на их гистерезисных характеристиках после достаточно продолжительного периода эксплуатации.

В синхронных машинах возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами на неподвижной части машины изменение магнитного потока происходит благодаря конструкции, обеспечивающей при движении подвижного элемента машины «переключение» пути замыкания магнитного потока, то есть обеспечивающей изменение направления вектора полезного магнитного потока, пронизывающего рабочую обмотку машины, на  $180^\circ$ .

На рис. 3 показан принцип функционирования магнитокоммутационного ЛГ.

Постоянный магнит, расположенный на неподвижной части ЭМ, создает магнитное поле. При смещении подвижного элемента происходит переключение магнитного потока.

Из рис. 3,а следует, что магнитный поток пронизывает рабочую катушку снизу вверх. При смещении зубчатого подвижного элемента (рис. 2,б) направление магнитного потока меняется на противоположное. Следовательно, при движении зубчатого подвижного элемента магнитный поток, пронизывающий обмотки, изменяется. В результате в соответствии с законом электромагнитной индукции на обмотках линейного электромеханического преобразователя, работающего в ге-



**Рис. 3.** Магнитокоммутационная синхронная машина с постоянными магнитами на неподвижной части

нераторном режиме, появляется переменное напряжение, пропорциональное скорости изменения магнитного потока.

Магнитокоммутационные машины возвратно-поступательного движения, так же как и магнитоэлектрические машины возвратно-поступательного движения, могут быть спроектированы в многофазном исполнении, однако конструкция активной части таких машин накладывает ограничения, вынуждающие в обязательном порядке соблюдать соответствие количества пар полюсов количеству рабочих обмоток машины.

Проведенный анализ дал возможность установить, что конструкция магнитокоммутационного ЛГ отличается лучшими по сравнению с магнитоэлектрическим ЛГПМ значениями удельной массы (70 – 80 Вт/кг), но меньшими значениями КПД.

Магнитокоммутационный ЛГ отличается меньшим по сравнению с магнитоэлектрическим ЛГПМ снижением мощности и КПД при отклонении амплитуды колебаний подвижной части от номинального значения в пределах 25 %

Для магнитокоммутационных ЛГ рекомендовано принимать соотношения ширины постоянного магнита к его толщине в пределах 3,5 – 4,5 для обеспечения максимума КПД, а для обеспечения максимума мощности – в пределах 2,5 – 3,5.

### Список литературы

1. **Высоцкий В.Е., Олейников А.М.** Специальные электромеханические преобразователи для электротехнических комплексов автономных объектов. М.: Инновационное машиностроение, 2020.

2. **Дмитриевский В.А., Прахт В.А.** Различные конфигурации электрических машин с магнитами на зубцах статора // Уральский федеральный университет. Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 20.12.2011.

## Именной указатель

- Авдеенко Д.В., 164  
Агеев М.Р., 51  
Алиферов А.И., 266  
Бабицкий Д.Ю., 90  
Бакиров А.А., 170  
Бедекер А.А., 53  
Белоусов И.В. 46  
Бержанский В.Н., 40+,75, 80, 160, 164, 178  
Благодаров Д.А., 51  
Бова Е.В., 46  
Боровик А.А., 39  
Бояркин М.И., 39  
Бычков С.А., 190  
Вавилов В.Е., 170  
Васильев Е.Б., 13, 269  
Васильев Р.Е., 269  
Верхола А.В., 28  
Ветошко П.М., 160, 164  
Вырыханов д.А., 94  
Высоцкий В.Е., 270  
Геворкян В.М., 100  
Гейнрих Г.О., 90  
Герасимчук О.А., 116  
Горлов А.Н., 106  
Горбунов М.С., 228  
Грачева Е.И., 106  
Гуполов М.К., 111  
Гусев С.А., 75  
Денисенко В.И., 233  
Денисов В.Н., 155, 183  
Двоглазов К.Н., 233  
Долгов А.И., 75  
Журов И.О., 33  
Захаров А.В., 53  
Зайцева Д.С., 214  
Золотарев В.В., 266  
Иноземцев А.А., 170  
Казанцев Ю.А., 100  
Каминская Т.П., 58  
Каравайников А.В., 75  
Карпенко Г.В., 214  
Кашенков А.В., 53  
Кириякин А.А., 212  
Киселев М.Г., 26  
Кобелев А.С., 15, 53  
Кожеченко А.С., 139  
Комаров В.Г., 224, 233  
Конюшенко Е.В., 85  
Корякин А.Г., 137, 218, 243  
Котин К.С., 245  
Кочетов И.И., 111  
Крутских В.В., 51  
Кручинин А.М., 131, 139  
Крюков К.В., 196  
Крючков А.А., 214  
Крючков И.А., 116,  
Кудряшов А.Л., 75  
Кувалдин А.Б., 245  
Кулешева Г.С., 144  
Курбатов П.А., 85  
Курбатова Е.П., 85  
Курилин С.П., 155, 183  
Лагунов И.М., 80  
Лебедева А.В., 211  
Лепанов М.Г., 26  
Лисовин И.Г., 170  
Луговской Н.В., 80  
Лагунов И.М., 260  
Луконин Д.А., 233  
Любутин И.С., 32  
Люткин В.В., 233  
Ляшко С.Д., 75  
Маслоченков И.А., 111

Мизин А.И., 5  
Михайлова Т.В., 75  
Михеев Д.В., 144  
Молоканов О.Н., 85  
Молостова А.В., 250  
Морозов А.Н., 124  
Морозов Н.А., 124  
Наумов О.В., 106  
Недвиги А.С., 75  
Невский Р.Е., 116  
Овчинникова И.А., 218, 269  
Ооржак А.А., 206  
Османов С.В., 75  
Петрович М.Т., 150  
Плыткевич В.В., 63,69  
Погребисский М.Я., 131, 139, 150  
Подольская Л.В., 211  
Полулях С.Н., 160, 164  
Пономаренко В.И., 260  
Попов В.В., 164  
Приступ А.Г., 90  
Пронин А.С., 214  
Родькин Н.С., 196  
Рязанова Е.С., 131, 139  
Сальников М.С., 51  
Саможей О.С., 228  
Сарапулов С.Ф., 190  
Сарапулов Ф.Н., 190  
Саушев А.В., 46  
Сафонов Ю.М., 51  
Семенова Н.А., 39  
Семук Е.Ю., 164  
Серикив В.А., 266  
Скороходов Е.В., 75  
Смолянов И.А., 190  
Сметанин В.В., 233  
Смирнов А.М., 224  
Снегирев Н.И., 32  
Соковишин А.В., 116  
Соломатин А.В., 26, 196  
Стаханова С.В., 111  
Степанова Т.А., 214  
Степович М.А., 58  
Стругацкий М.Б., 32  
Суслов Д.А., 160  
Сыров А.А., 178  
Тарасов Ф.Е., 190  
Теплякова Е.В. 5  
Тихонов А.И., 58, 200  
Ткачѐв О.В., 116  
Томилин С.В., 40, 178  
Томилина О.А., 40  
Трухина О.Д., 111  
Хахичев А.С., 218  
Холодный Д.С., 137, 243  
Филиппов Д.М., 256  
Церковский Ю.Б., 26, 196  
Чжо Зин Хтай, 238  
Чернов М.Ю., 116  
Чурсин А.Ю., 131, 139  
Шавров В.Г., 160  
Шапошников А.Н., 75  
Швыдкий Е.Л., 190  
Шевченко А.Ф., 90  
Шипко М.Н., 58  
Ширицкий С. В., 206  
Широков Н.В., 46  
Шолуденко М.В., 39, 211  
Шувалов М.Ю., 176, 214  
Шуйский А.А., 256  
Шутов А.В., 100  
Щетинин Е.В., 212  
Эргашев Д.Э., 116  
Юрков Д.И., 116  
Ягупов С.В., 32

# Оглавление

Организаторы конференции.....	3
Международный комитет .....	4
Программный комитет .....	4
Организационный комитет .....	4
Пленарное заседание.....	5
1. Перспективы разработки и производства крупных электрических машин госкорпорации «Росатом». Мизин А.И., Теплякова Е.В. ....	5
2. Ретроспектива развития кабельной промышленности России. Анализ, тенденции и прогнозы. Васильев Е.Б.....	13
3. Проблемная область и методы искусственного интеллекта применительно к задачам электромеханики. Кобелев Л.С. ....	15
Доклады участников.....	26
1. Метод релейной модуляции в сетевом регуляторе. Киселев М.Г., Лепанов М.Г., Церковский Ю.Б., Соломатин А.В.....	26
2. Исследование энерговыделения в дуге отключения низковольтного вакуумного контактора. Верхола А.В. ....	28
3. Параметры сверхтонкой структуры ядер $^{57}\text{Fe}$ в кристаллах $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x\text{VO}_3$ . Снегирёв Н.И., Старчиков С.С., Любутин И.С., Чуев М.А., Ягупов С.В., Стругацкий М.Б.....	32
4. Моделирование асинхронной машины с учетом магнитного насыщения потерь в стали в программном пакете matlab/simulink. Журов И.О.....	33
5. Кабели для высокоскоростных интерфейсов с пленко-пористой фторопластовой изоляцией. Шолуденко М.В., Семенова Н.А., Боровик А.А., Бояркин М.И.....	39
6. Обратный перколяционный переход в тонких плёнках Au. Томилина О.А., Томилин С.В., Бержанский В.Н.....	40
7. Инновационные разработки в области электропривода на транспорте. Саушев А.В., Белоусов И.В., Бова Е.В., Широков Н.В....	46
8. Система управления электроприводом для совместной работы кранов. Благодаров Д.А., Сафонов Ю.М., Крутских В.В., Сальников М.С., Агеев М.Р. ....	51
9. Оценка влияния формы двухрядных аксиальных вентиляционных каналов статора на эффект возникновения добавочных потерь холостого хода, возникающих в сплошных оболочках энергонасыщенных электродвигателей. Захаров А.В., Бедкер А.А., Кащенко А.В., Кобелев А.С.....	53

10. Изучение влияния магнитоимпульсной обработки на структурное состояние поверхности и магнитные свойства аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB). Шипко М.Н., Каминская Т.П., Степович М.А., Вирюс А.А., Тихонов А.И.....	58
11. Опыт контроля паяных соединений стержневых обмоток статоров гидрогенераторов с использованием методов неразрушающего контроля. Плыткевич В.В., Кузьмичёв В.А.....	63
12. Расчетно-экспериментальная оценка вибрационного состояния синхронных гидрогенераторов. Плыткевич В.В., Кузьмичёв В.А. ....	69
13. Особенности формирования магнитоплазменных структур на основе структурированных ферритов-гранатов. Османов С.В., Ляшко С.Д., Михайлова Т.В., Скороходов Е.В., Каравайников А.В., Кудряшов А.Л., Недвига А.С., Долгов А.И., Гусев С.А., Бержанский В.Н., Шапошников А.Н. ....	75
14. Переносной магнитооптический вихретоковый дефектоскоп с микропроцессорным управлением. Луговской Н.В., Лагунов И.М., Бержанский В.Н. ....	80
15. Машины вернье с постоянными магнитами. Конюшенко Е.В., Молоканов О.Н., Курбатова Е.П., Курбатов П.А. ....	85
16. Выбор магнитных систем роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами с повышенными удельными характеристиками. Бабицкий Д.Ю., Гейнрих Г.О., Приступ А.Г., Шевченко А.Ф. ....	90
17. Определение функции электрического тока, потребляемого линейным электромагнитным двигателем, по заданным динамическим характеристикам. Вырыханов Д.А. ....	94
18. Добротность диэлектрического резонатора в запредельном волновод с потерями. Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Шутов А.В. ..	100
19. Forecasting technical state and efficiency functioning of electric switching devices of electrical complexes. Elena I. Gracheva, Oleg V. Naumov, Alexey N. Gorlov .....	106
20. Разработка суперконденсатора с увеличенным рабочим напряжением и расширенным температурным интервалом эксплуатации для использования в силовых установках гибридного транспорта. Кочетов И.И., Маслоченко И.А., Трухина О.Д., Стаханова С.В., Гуполов М.К. ....	111
21. Создание защитного покрытия сцинтилляционной детектирующей ячейки. Крючков И.А., Соковишин А.В., Юрков Д.И., Эргашев Д.Э., Герасимчук О.А., Невский Р.Е., Ткачёв О.В., Чернов М.Ю. ....	116

22. Выявление электромагнитных дефектов синхронных генераторов по несимметриям внешнего магнитного поля. Казаков Ю.Б., Морозов А.Н., Морозов Н.А. ....	124
23. Моделирование тепловых процессов в плазменно-дуговых печах. Кручинин А.М., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. ....	131
24. Сейсмическая стойкость подвесных оптических кабельных линий при различных способах прокладки. Корякин А.Г., Холодный Д.С. ....	137
25. Расчет характеристик дуги для критического режима дуговой сталеплавильной печи постоянного тока. Кручинин А.М., Кожеченко А.С., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. ....	139
26. Моделирование переходных процессов при отключении фильтрокомпенсирующих устройств на основе каткона от электрической сети с изолированной нейтралью. Кулешова Г.С., Михеев Д.В. ....	144
27. Усовершенствованный регулятор температуры электропечи сопротивления. Погребиский М.Я., Петрович М.Т. ....	150
28. Метод многомерной диагностики и прогнозирования технического состояния электромеханической системы. Курилин С.П., Денисов В.Н. ....	155
29. Магнитооптическая визуализация магнитных фаз в эпитаксиальной пленке феррита граната вблизи точки компенсации. Ветошко П.М., Бержанский В.Н., Полулях С.Н., Суслов Д.А., Маширов А.В., Шавров В.Г., Павлюк Е.И. ....	160
30. Эффект фотоиндуцированной магнитной анизотропии в эпитаксиальных пленках феррита граната висмута. Авдеенко Д.В., Бержанский В.Н., Ветошко П.М., Полулях С.Н., Попов В.В., Семук Е.Ю. ....	164
31. Многодисциплинарное проектирование авиационного электропривода топливного и масляного насосов. Вавилов В.Е., Иноземцев А.А., Лисовин И.Г., Бакиров А.А., Пронин Е.А. ....	170
32. Надёжности силовых кабелей среднего и высокого напряжения. Шувалов М.Ю. ....	176
33. Модификация свойств пленок ферритов гранатов методом ионно-плазменной обработки. Сыров А.А., Бержанский В.Н., Томилин С.В. ....	178
34. Модель и методы исследования линейных асинхронных двигателей. Денисов В.Н., Курилин С.П. ....	183

35. Особенности электромагнитного расчета индукционной тигельной печи методом детализированных схем замещения. Бычков С.А., Миронов С.Е., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Смольянов И.А., Тарасов Ф.Е., Швыдкий Е.Л. ....	190
36. Метод поиска точки максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей. Крюков К.В., Родькин Н.С., Церковский Ю.Б., Шорсткин И.П., Баранов Н.Н., Соломатин А.В.	196
37. Оперативная разработка и публикация виртуальных лабораторных практикумов по инженерным дисциплинам. Тихонов А.И. ....	200
38. Энергоэффективные синхронные двигатели с постоянными магнитами с прямым пуском. Ооржак А.А., Ширинский С.В. ....	206
39. Облегченные монтажные теплостойкие провода с комбинированной (двойной) изоляцией. Шолуденко М.В., Подольская Л.В., Лебедева Е.В. ....	211
40. Разработка методики расчета магнитных потерь в постоянных магнитах высокооборотных синхронных машин. Кирякин А.А., Щетинин Е.В. ....	212
41. Применение микрофлуоресцентного анализа в исследовании качества и исследования с целью создания сшиваемых изоляционных пвх пластикатов. Зайцева Д.С., Крючков А.А., Пронин А.С., Степанова Т.А., Шувалов М.Ю., Карпенко Г.В. ....	214
42. Микрокабели для систем дистанционного управления подвижными подводными объектами . Овчинникова И.А., Корякин А.Г., Хахичев А.С. ....	218
43. Магнитолевитационная система подвешивания транспортного средства. Смирнов А.М., Комаров В.Г. ....	224
44. Автоматизация процесса выполнения электрического расчёта наземного электрического транспорта. Горбунов М.С., Саможей О.С. ....	228
45. Радиационно-стойкие асинхронные двигатели для гидрометаллургической переработки отработанного ядерного топлива. Сметанин В.В., Денисенко В. И., Лыткин В.В., Луконин Д.А. Двоглазов К.Н. ....	233
46. Анализ модуля энергосистемы для электроснабжения транспортной системы электро мьянмы на основе магнитной левитации. Чжо З. Х., Глушенков В. А., Комаров В. Г. ....	238

47. Сейсмическая стойкость подвесных оптических кабельных линий при различных способах прокладки. Корякин А.Г., к.т.н., Холодный Д.С, к.ф-м.н. ....	243
48. Разработка конструкции устройства индукционного нагрева металлических изделий в режиме левитации. Котин К.С., Кувалдин А.Б. ....	245
49. Разработка источника электропитания для индукционно-резистивной системы обогрева промышленных трубопроводов на основе трансформатора скотта. Федин М.А., Молостова А.В. ....	250
50. Оценка потерь на вихревые токи в магнитной системе электрической машины осевого потока. Филиппов Д.М., Шуйский А.А. ....	256
51. Расчет характеристик и оптимизация параметров радиопоглощающих материалов на основе решеток резистивных элементов. Пономаренко В.И., Лагунов И.М. ....	260
52. Влияние конструкции водоохлаждаемого свода электродуговой печи для получения карбида кальция на ее эксплуатационные характеристики. Золотарев В.В., Алиферов А.И., Сериков В.А. ....	266
53. Оптические кабели для атомных станций: проблемы и пути решения. Васильев Е.Б., Васильев Р.Е., Овчинникова И.А. ....	269
54. Сравнительный анализ линейных генераторов для электроэнергетических комплексов автономных объектов. Высоцкий В.Е. ....	270
Именной указатель .....	276

*Научно-техническое издание*

Труды XIX Международной Конференции  
«Электротехника, Электротехнологии,  
Электротехнические материалы и Компоненты»

Издательство "Знак"  
Москва, 111024, 2-я Кабельная ул., 2

Подписано в печать 30.11.2022  
Формат 60 x 90/16. Печ.л. 17,5  
Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в ООО "Галлея-Принт"  
Москва, 5-я Кабельная ул., д. 2Б, стр. 1

