

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство о регистрации СМИ  
ПИ N ФС 77-29963  
от 17 октября 2007 г.

**Главный редактор:**  
В.А. Осипова

**Редакционный совет:**

М.П. Бадер, д.т.н., профессор  
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор  
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент  
Л.А. Герман, д.т.н., профессор  
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор  
В.В. Калугин, д.т.н., доцент  
А.А. Ковалев, д.т.н.  
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент  
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент  
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор  
А.И. Попов, д.т.н., профессор  
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент  
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор  
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор  
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент  
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор

**Выпускающий редактор:**  
О.А. Кожухова

**Редакция:**  
140070, Московская область,  
Люберецкий район, п. Томилино,  
ул. Гаршина, д. 11.

Тел./факс: (495) 500-40-20  
E-mail: npptez@mail.ru  
Сайт: www.npptez.ru

**Подписано в печать:** 15.04.2022 г.

Журнал издается в электронном виде.  
Адрес сайта: eet-journal.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

- Нефедьев А.И., Шаронова В.Г., Гусев В.Г.**  
*Конденсаторно-транзисторный модуль зажигания  
газового двигателя внутреннего сгорания* ..... 2
- Скорик В.Г., Малышева О.А., Супрун Д.А.**  
*Энергетический критерий выявления обрыва  
тиристорного плеча силового преобразователя  
электровоза переменного тока* .....6
- Лобынцев В.В., к.т.н., Фокин С.Г., Кичко С.А.,  
Поляшов А.А., Дураков Д.Н., Куштан М.И., Буряков И.Н., Устинов В.С.**  
*Исследование работоспособности электромеханических  
систем движительно-рулевого комплекса  
бывшего в длительной эксплуатации  
обитаемого подводного аппарата* ..... 11
- Серебряков А.С., Герман Л.А., Дулепов Д.Е., Осокин В.Л.**  
*Фильтрокомпенсирующая установка для повышения  
пропускной способности и снижения потерь мощности  
в тяговой сети железных дорог* ..... 18

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ

- Рыжова Е.Л.**  
*Новые системы изоляции тяговых двигателей* ..... 23
- Прохор Д.И., Никитин В.В., Евстафьев А.М.**  
*Совершенствование системы контроля изоляции  
тяговых двигателей локомотивов* ..... 26

### ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

- Еркебаев А.**  
*Контроль технического состояния силовых трансформаторов  
методом акустического диагностирования* ..... 31
- Николаев П.А., Козловский В.Н., Подгорный А.С., Брачунова У.В.**  
*Разработка вероятностно-статистической  
математической модели и критерия оценки соответствия  
бортового электрооборудования партии автомобилей  
по параметрам помехоустойчивости* ..... 39

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

- Гридин В.М.**  
*Электромагнитные процессы в бесконтактных  
двигателях постоянного тока с двумя индукторами* ..... 44

## Конденсаторно-транзисторный модуль зажигания газового двигателя внутреннего сгорания

### // CAPACITOR-TRANSISTOR IGNITION MODULE OF A GAS INTERNAL COMBUSTION ENGINE //

**Нефедьев А.И.,**  
**Волгоградский государственный**  
**технический университет,**  
**г. Волгоград**

**Шаронова В.Г.,**  
**Пензенский государственный**  
**университет архитектуры**  
**и строительства,**  
**г. Пенза**

**Гусев В.Г.,**  
**Волгоградский государственный**  
**технический университет,**  
**г. Волгоград**

*Повышение надежности работы системы зажигания газового двигателя зависит от качества и надежности искрообразования в цилиндрах двигателя. Статья посвящена исследованию влияния параметров*

*искрового разряда на качество сгорания газовой смеси при различных типах катушек зажигания и различных свечах зажигания. Предложена структурная схема конденсаторно-транзисторного модуля системы зажигания. Обнаружено, что использование конденсаторно-транзисторной системы зажигания позволяет получить искровой разряд с высокой длительностью и с высокой скоростью нарастания напряжения на свече зажигания. Приведены результаты сравнительных испытаний транзисторной, конденсаторной и конденсаторно-транзисторной систем зажигания.*

*Ключевые слова:* конденсаторная система зажигания, свеча зажигания, катушка зажигания, газовоздушная смесь, искровой разряд, газовый двигатель.

*Improving the reliability of the ignition system of a gas engine depends on the quality and reliability of sparking in the engine cylinders. The article is devoted to the study of the influence of spark discharge parameters on the quality of combustion of a gas-air mixture with various types of ignition coils and various spark plugs. A block diagram of the capacitor-transistor module of the ignition system is proposed. The use of a capacitor-transistor ignition system makes it possible to obtain a spark discharge with a high duration and a high rate of voltage rise on the spark plug has been found. The results of comparative tests of transistor, capacitor and capacitor-transistor ignition systems are presented.*

*Key words:* capacitor ignition system, spark plug, ignition coil, gas-air mixture, spark discharge, gas engine.

Улучшение эксплуатационных показателей топливной экономичности и экологичности ДВС с искровым зажиганием может быть достигнуто при помощи двигателя, способного работать при малых и средних нагрузках на бедных топливовоздушных смесях [1,2].

При использовании в двигателе газовой смеси возникают проблемы, связанные с низкой скоростью горения и резким снижением по мере обеднения скорости сгорания природного газа, что является одной из причин повышения выбросов несгоревших углеводородов СН, падения мощности и КПД газового двигателя [3].

Эмиссия вредных веществ газового двигателя внутреннего сгорания (ДВС) строго ограничивается нормативными требованиями [4]. Поэтому перебой в зажигании и неполное сгорание рабочей смеси, вызывающее резкое увеличение эмиссии углеводородов (СН), должны обязатель-

но исключаться. Одним из условий этого является способность системы зажигания генерировать достаточно большую энергию зажигания на протяжении всего срока службы.

В самом начале своего распространения от свечи скорость пламени близка к скорости ламинарного горения (с учетом расширения продуктов сгорания). Затем скорость распространения пламени постепенно увеличивается. Скорость распространения пламени в основной фазе сгорания подчиняется законам крупномасштабного турбулентного горения, мало зависит от физико-химических свойств горючей смеси и практически почти целиком определяется скоростями крупных турбулентных пульсаций. Это приводит к тому, что длительность основной фазы горения оказывается почти независимой от частоты вращения коленчатого вала и мало зависит от состава смеси [5].

Факторы, способствующие расширению зоны пламени, как, напри-

мер, обеднение смеси, разбавление ее инертными газами, снижение давления, требуют увеличения критической мощности искры. Последняя также возрастает при воспламенении турбулизованных смесей, что объясняется увеличенной шириной зоны турбулентного горения по сравнению с зоной ламинарного пламени. Высокая мощность индуктивной фазы разряда, в процессе которой к начальному очажку горения подводится дополнительная тепловая энергия, способствует более стабильному воспламенению в двигателях, особенно на режимах малых нагрузок и при работе на обедненных смесях. Скорость распространения пламени сильно возрастает, если газоздушная смесь находится в интенсивном турбулентном движении.

Таким образом, форсирование начальной фазы, т.е. форсирование начального очага горения, сокращает ее длительность, снижает вероятность пропусков воспламенения, и

достигается увеличением межэлектродного зазора свечи зажигания и мощности искры [6].

Формирование инициирующего разряда в современных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) обычно осуществляется транзисторным, конденсаторным или комбинированным (конденсаторно-транзисторным или конденсаторно-тиристорным) оконечным каскадом электронной системы управления двигателем (ЭСУД), цикл разряда которого состоит из двух основных этапов. Первый этап – заряд распределенных емкостей вторичной обмотки катушки зажигания и быстрый рост высокого напряжения, а на втором этапе происходит пробой межэлектродного зазора в свече зажигания и формирование инициирующего разряда, имеющего две составляющие: емкостную и индуктивную.

В течение емкостной фазы разряда происходит практически мгновенное нагревание газозвушной смеси искровым каналом до температур, превышающих 104 градусов, а основная энергия выделяется в индуктивной фазе, что препятствует затуханию горения, так как количество тепловой энергии этой фазы значительно больше, чем емкостной.

В транзисторных системах зажигания токовременные характеристики индуктивной составляющей инициирующего разряда определяются в основном параметрами вторичной высоковольтной цепи разряда и не зависят от параметров разомкнутой первичной низковольтной цепи.

Анализ литературы и результаты экспериментальных исследований показывают, что искровой разряд транзисторных систем зажигания с накоплением энергии в индуктивности остро нуждается в повышении разрядного тока даже в ущерб его длительности. В системах с накоплением энергии в конденсаторе (КСЗ) реализуется разряд с повышенными токами.

Пробивное напряжение определяется не только электрическим полем, необходимым для возникновения пробоя искрового промежутка свечи зажигания, но и скоростью нарастания напряжения, что увеличение скорости нарастания напряжения ведет к уменьшению пробивного напряжения [6].

Высокая скорость нарастания напряжения, обеспечиваемая КСЗ, позво-

ляет при соответствующей полярности приложенного напряжения увеличить до 0,75-1,1 мм межэлектродный зазор свечи зажигания, что подтверждено данными, полученными на моторном стенде НТЦ ОАО "КАМАЗ".

Форма напряжения во вторичной цепи катушки зажигания штатной транзисторной системы зажигания в составе ЭСУД «М20» газового двигателя КамАЗ мод.820.52-260 показана на рис 1.

На рис. 1 обозначены:  $U_1$  – напряжение, формируемое во вторичной цепи при накоплении энергии (при линейном нарастании тока в первичной цепи катушки зажигания);  $U_2$  – напряжение пробоя искрового промежутка свечи зажигания;  $U_3$  – падение напряжения на участке – внутреннее сопротивление свечи зажигания и искровой промежуток свечи;  $t_1$  – время накопления энергии в первичной обмотке и магнитопроводе катушки зажигания;  $t_2$  – время "сброса" энергии катушки зажигания – длительность горения искры;  $t_3$  – время "рассеивания" остаточной энергии катушки зажигания после прекращения горения искры.

На основании анализа проведенных лабораторных и моторных испытаний штатной транзисторной системы зажигания и КСЗ был разработан конденсаторно-транзисторный модуль зажигания (КТМЗ) для ЭСУД с двухфазной индуктивной составляющей искрового разряда, позволяющий совместить все достоинства

конденсаторной и транзисторной систем зажигания – высокое значение амплитуды тока первой индуктивной составляющей искрового разряда и высокую скорость нарастания вторичного напряжения [7]. Такое построение КТМЗ позволяет пробить увеличенный искровой зазор свечи зажигания, а также получить большую длительность второй индуктивной фазы искрового разряда, характерную для транзисторной системы зажигания.

Структурная схема конденсаторно-транзисторного модуля зажигания приведена на рис. 2.

Модуль конденсаторно-транзисторной системы зажигания КТМЗ содержит формирователь импульса управления  $\Phi$ , определяющий длительность открытого состояния транзисторного ключа Кл, и запускаемый от датчика момента искрообразования ДМИ. Накопительный конденсатор С заряжается от повышающего преобразователя напряжения ПН [8] до напряжения 300 – 350 В. Для защиты транзисторного ключа Кл от повышенного напряжения применен блок защиты БЗ. Первичная обмотка катушки зажигания КЗ подключена к выходу модуля зажигания.

При уменьшении напряжения на конденсаторе С до уровня напряжения бортовой сети, открывается диод VD, и ток течет от бортовой сети через диод VD, первичную обмотку катушки зажигания и транзисторный ключ. При запираии транзистор-

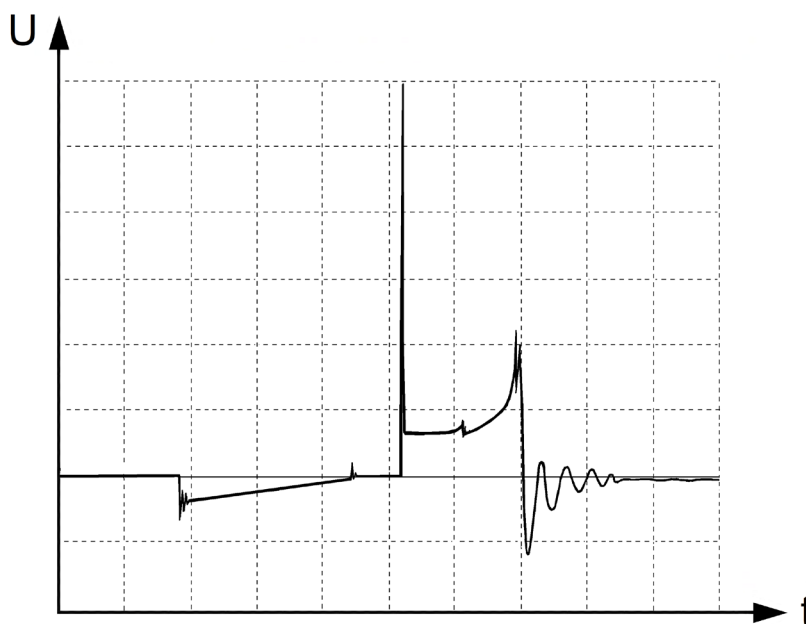


Рис. 1. Форма напряжения во вторичной цепи катушки зажигания штатной транзисторной системой зажигания

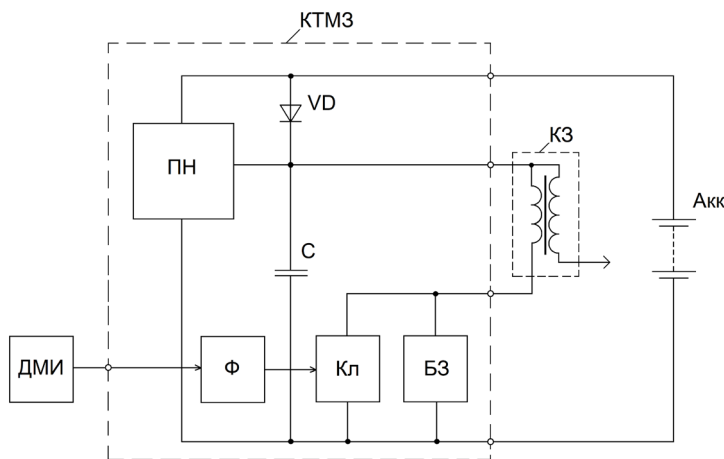


Рис. 2. Структурная схема конденсаторно-транзисторной системы зажигания

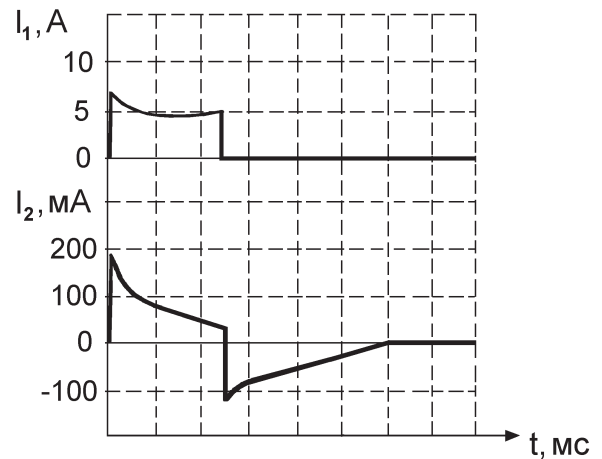


Рис. 3. Амплитудно-временные параметры КТМЗ с катушкой зажигания 27.3705 при испытании в камере прибора Э203-П

ного ключа начинается вторая (индуктивная) фаза искрового разряда, когда накопленная в магнитном поле катушки энергия вызывает в искровом зазоре свечи зажигания второй разряд обратной полярности.

Токи первичной ( $I_1$ ) и вторичной ( $I_2$ ) обмоток катушки зажигания 27.3705, полученные в приборе для проверки свечей зажигания Э203-П при давлении 10 атм., показаны на рис. 3. Межэлектродное расстояние в свече зажигания BRISK SUPER было установлено 0,75 мм.

Эффективное смесеобразование с обеспечением легкого доступа смеси к свече зажигания улучшает воспламеняемость так же, как и большие токи, продолжительность и длина искрового разряда, создаваемые большим зазором между электродами» свечи зажигания. Турбулентность смеси благоприятно на сказывается на ее воспламенении, так как она обеспечивает ускоренное расширение фронта пламени в камере сгорания и, следовательно, ускоренное сгорание смеси во всей камере сгорания.

Формы искрового разряда конденсаторно-транзисторной системы зажигания при испытании на шаровом разряднике при искровом зазоре 8 мм при наличии и отсутствии турбулентного потока показаны на рис. 4.

Проведенные моторные испытания транзисторной системы зажигания газового двигателя показали отсутствие пропусков процесса искрообразования в цилиндре двигателя.

При токе разрыва 7,5–8,0 А и напряжении питания бортовой сети 24 В время накопления энергии составляет 1,8–2,4 мс, а время “сброса”

энергии зависит от режима работы двигателя. При частоте вращения 800 об/мин время “сброса” энергии составляет 2,6 мс и с увеличением частоты вращения и нагрузки двигателя уменьшается до 0,35 мс. При этом эффективность поджога газовой смеси резко снижается.

По результатам испытаний был сделан вывод, что для повышения эффективности поджога газовой смеси необходимо увеличить энергию искрового разряда.

В результате лабораторных исследований и моторных испытаний восьмиканальной конденсаторной системы зажигания в составе микропроцессорной системы управления зажиганием [9, 10] и на моторном стенде НТЦ КАМАЗ выявлено:

- в цилиндре газового двигателя происходит существенное увеличение амплитуды тока второй индуктивной составляющей искрового разряда, по сравнению с испытанием в камере прибора Э203-П, в связи с существенной разницей в температурах за счет выделения тепла в процессе горения топливовоздушной смеси при моторных испытаниях. При повышении температуры увеличивается электропроводность искрового промежутка, что приводит к увеличению тока второй индуктивной составляющей искрового разряда;
- независимость токовременных параме-

тров первой и второй индуктивных составляющих искрового разряда от частоты вращения и нагрузки газового двигателя (для транзисторной системы на нагрузочных режимах характерна аномалия, т.е. в момент резкого нарастания давления в цилиндре «хвостовая» часть разряда гасится, а в обмотках катушки зажигания появляется мощный колебательный процесс рассеивания накопленной энергии).

Моторные испытания показали, что КСЗ позволяют исключить пропуски в системе зажигания, снизить расход топлива от 7 до 13 % на различных режимах работы двигателя и уменьшить выбросы углеводородов на холостом ходе до 70% по сравнению с окончательным транзисторным каскадом BOSCH.

Лабораторные и моторные испытания конденсаторно-транзисторной системы зажигания показали, что данная система обеспечивает

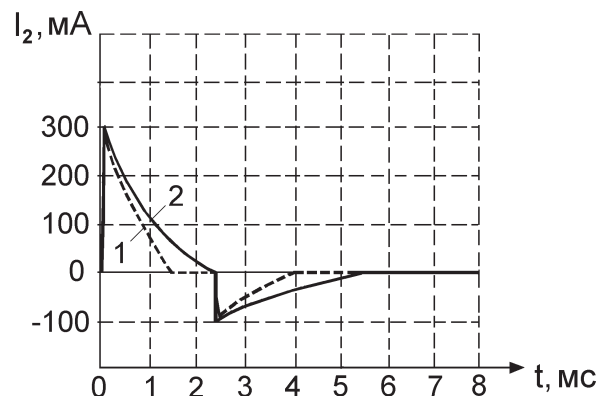


Рис. 4. Формы искрового разряда конденсаторно-транзисторной системы зажигания при испытании на шаровом разряднике  
1 – скорость турбулентного потока 10 м/с;  
2 – отсутствие турбулентности

повышение эффективности поджога газо-воздушной смеси в цилиндре газового ДВС из-за наличия двупольного искрового разряда большой мощности и длительности при помощи одного транзисторного ключа, что позволяет исключить пропуски в системе зажигания, снизить расход топлива от 7 до 13 % на различных режимах работы двигателя и уменьшить выбросы углеводородов на холостом ходе до 70% по сравнению с окончательным транзисторным каскадом BOSCH. Также преимуществом разработанной конденсаторно-транзисторной системы зажигания является возможность ее использования со стандартной катушкой в составе автомобильной системы зажигания.

### Литература

1. Барский, И. А. Повышение экономичности газового двигателя с искровым зажиганием на частичных нагрузках / Барский И.А., Вальехо Мальдонадо П. Р. // Автомобильная промышленность, 2008. – № 9. – С. 10-11.
2. Ютт, В. Е. Электрооборудование автомобилей. Учеб. для студентов вузов / В. Е. Ютт. – М.: Транспорт, 1995. – 304 с.
3. Контроль параметров искрового разряда в двигателе внутреннего сгорания / А.И. Нефедьев, В.Г. Гусев, Д.И. Нефедьев, В.Г. Шаронова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – 51-57.
4. ГОСТ Р 54942-2012. Газобаллонные автомобили с искровыми двигателями. Выбросы вредных (загрязняющих) веществ с отработавшими газами. Нормы и методы контроля при оценке технического состояния. Введен 01.03.2013 г. – М.: Стандартинформ, 2013. – 14 с.
5. Францев, С.М. Исследование длительности искрового разряда транзисторной системы зажигания на нагрузочных режимах работы и холостом ходу двигателя / С.М. Францев, А.Ю. Кавторов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1.
6. Шаронов, Г.И. Конденсаторные модули зажигания для двигателей внутреннего сгорания: монография / Г.И. Шаронов, А.И. Нефедьев, Л.А. Симонова; Казанский федеральный ун-т, Набережночелнинский ин-т. – Казань: монография, 2016. – 138 с.
7. Патент РФ на ПМ №116578, МПК F02P 3/08. Коммутатор системы зажигания двигателя внутреннего сгорания / А.И. Нефедьев, Г.И. Шаронов; – № 2011150378/07; заявл. 09.12.2011; опубл. 27.05.2012; Бюл. № 15.
8. Нефедьев, А.И. Однотактный обратный стабилизированный преобразователь постоянного напряжения / А.И. Нефедьев, Г.И. Шаронов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – 24-26.
9. Нефедьев, А.И. Development of Microprocessor-Based Car Engine Control System / А.И. Нефедьев, Г.И. Шаронов // Procedia Engineering. Vol. 150 : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1341-1344.
10. Шаронов, Г.И. Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля / Г.И. Шаронов, А.И. Нефедьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 3. – 2-4.

#### Нефедьев Алексей Иванович

Родился в 1965 году. В 1987 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». В 2000 году защитил кандидатскую диссертацию, а в 2013 – докторскую. Тема докторской диссертации: «Широкодиапазонные электростатические и электродинамические компараторы переменного тока для измерений электроэнергетических величин». Доктор технических наук, доцент. Опыт работы – 34 года. В настоящий момент работает профессором кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета. Автор более 230 публикаций, в том числе 67 авторских свидетельств и патентов.

#### Nefediev Alexey Ivanovich

Was born in 1965. In 1987 he graduated from the Penza Polytechnic Institute majoring in Radio Engineering. In 2000 he defended his Candidate's dissertation and in 2013 his Doctor's dissertation. Topic of doctoral dissertation: "Wide-range electrostatic and electrodynamic alternating current comparators for measuring electric power quantity" Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. 34-year work experience. At the moment he works as the professor at the Electrical Engineering Department of the Volgograd State

Technical University. Author of more than 230 publications, including 67 copyright certificates and patents.

#### Шаронова Вероника Геннадьевна

Родилась в 1973 году. В 2004 году окончила Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по специальности «Архитектура». Опыт работы 24 года. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Основы архитектурного проектирования» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Автор более публикаций, в том числе 14 авторских свидетельств и патентов.

#### Sharonova Veronika Gennadievna

Was born in 1973. In 2004 she graduated from the Penza State University of Architecture and Construction majoring in Architecture. She has 24-year work experience. At the moment he works as Senior Lecturer at the Architectural Basis of Design Department of the Penza State University of Architecture and Construction. Author of many publications, including 14 copyright certificates and patents.

#### Гусев Владимир Георгиевич

Родился в 1995 году. В 2019 году закончил Волгоградский государственный технический университет по специальности «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». В настоящий момент является аспирантом кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета. Автор 4 научных статей.

#### Gusev Vladimir Georgievich

Was born in 1995. In 2019 he graduated from the Volgograd State Technical University majoring in Design and Technological Support of Machine-Building Production. At the moment he is post-graduate student of the Electrical Engineering Department of the Volgograd State Technical University. Author of 4 scientific articles.

# Энергетический критерий выявления обрыва тиристорного плеча силового преобразователя электровоза переменного тока

// ENERGY CRITERION FOR DETECTION OF THE BREAK IN THE THYRISTOR ARM OF THE POWER CONVERTER OF THE AC ELECTRIC LOCOMOTIVE //

Скорик В.Г., к.т.н.,  
Дальневосточный  
государственный университет  
путей сообщения, Хабаровск

Малышева О.А., к.т.н.,  
Дальневосточный  
государственный университет  
путей сообщения, Хабаровск

Супрун Д.А.,  
Дальневосточный  
государственный университет  
путей сообщения, Хабаровск

В статье приведено описание критерия, позволяющего определить поврежденное тиристорное плечо в выпрямительно-инверторном преобразователе

В настоящее время железнодорожный транспорт является ключевым звеном транспортной системы России. Развитие железных дорог напрямую связано с повышением пропускной и провозной способностей участков, полигонов и ростом грузо- и пассажирооборота. Для решения этой задачи необходимо обеспечение стабильной работоспособности тягового подвижного состава в любых условиях эксплуатации.

Основным узлом магистральных электровозов, обеспечивающим создание необходимых тяговых усилий в зависимости от режима ведения поезда, является выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), построенные на тиристорах (рис. 1). Они позволяют осуществлять регулирование напряжения на электродвигателях электровозов, и, как следствие, силы тяги всего состава.

Одной из возможных причин нарушения нормальной работы ВИП

электровозов переменного тока с коллекторным электроприводом. В качестве критерия предложено оценивать энергию в цепи выпрямленного тока за каждый полупериод сетевого напряжения. Приведены аналитические выражения, позволяющие производить расчет граничных условий определения аварийного режима. Представлены результаты математического моделирования применения предложенного критерия в программной среде Matlab Simulink.

**Ключевые слова:** выпрямительно-инверторный преобразователь, режим тяги, электровоз, интеграл Дюамеля, потеря управления.

является потеря управления тиристорным плечом. В этом случае необходимо выявить поврежденное плечо в процессе движения поезда по участку железной дороги и, по возможности, обеспечить продолжение работы электровоза без существенного снижения его эксплуатационных характеристик.

Одним из способов выявления поврежденных плеч в режиме реального времени ранее был предложен алгоритм, основанный на анализе кривой выпрямленного напряжения и энергетических показателей процесса. В качестве критерия нарушения работы преобразователя и определения не открывшегося тиристорного плеча использовались относительные значения отдельных гармоник ряда Фурье в кривой выпрямленного напряжения [1].

The article provides a description of the criterion that allows you to determine the damaged thyristor arm in the rectifier-inverter converter of AC electric locomotives with a collector electric drive. As a criterion, it is proposed to evaluate the energy in the rectified current circuit for each half-cycle of the mains voltage. Analytical expressions are given that allow calculating the boundary conditions for determining the emergency mode. The results of mathematical modeling of the application of the proposed criterion in the Matlab Simulink software environment are presented.

**Keywords:** rectifier-inverter converter, traction mode, electric locomotive, Duhamel integral, loss of control.

Однако в некоторых режимах работа преобразователя относительно значения высших гармоник при наличии повреждения незначительно отличается от аналогичных параметров в нормальном режиме. Поэтому в таких

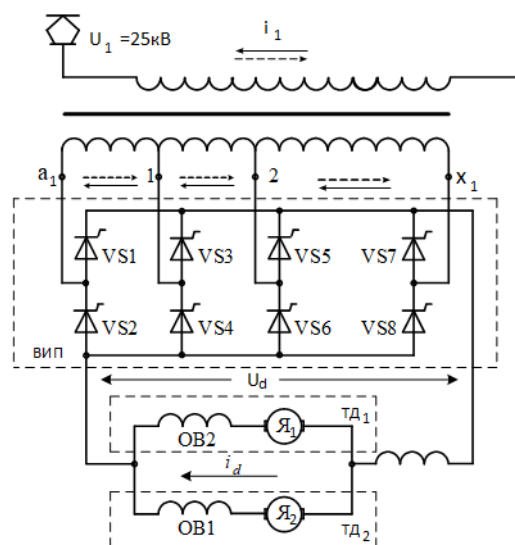


Рис. 1. Упрощенная схема силовых электрических цепей электровоза

В настоящее время железнодорожный транспорт является ключевым звеном транспортной системы России. Развитие железных дорог напрямую связано с повышением пропускной и провозной способностей участков, полигонов и ростом грузо- и пассажирооборота. Для решения этой задачи необходимо обеспечение стабильной работоспособности тягового подвижного состава в любых условиях эксплуатации.

Основным узлом магистральных электровозов, обеспечивающим создание необходимых тяговых усилий в зависимости от режима ведения поезда, является выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), построенные на тиристорах (рис. 1). Они позволяют осуществлять регулирование напряжения на электродвигателях электровозов, и, как следствие, силы тяги всего состава.

Одной из возможных причин нарушения нормальной работы ВИП является потеря управления тиристорным плечом. В этом случае необходимо выявить поврежденное плечо в процессе движения поезда по участку железной дороги и, по возможности, обеспечить продолжение работы электровоза без существенного снижения его эксплуатационных характеристик.

Одним из способов выявления поврежденных плеч в режиме реального времени ранее был предложен алгоритм, основанный на анализе кривой выпрямленного напряжения и энергетических показателей процесса. В качестве критерия нарушения работы преобразователя и определения не открывшегося тиристорного плеча использовались относительные значения отдельных гармоник ряда Фурье в кривой выпрямленного напряжения [1].

Однако в некоторых режимах работа преобразователя относительные значения высших гармоник при наличии повреждения незначительно отличается от аналогичных параметров в нормальном режиме. Поэтому в таких режимах алгоритм определения поврежденного плеча может работать нестабильно.

Для повышения чувствительности и надежности системы выявления обрывов тиристорных плеч необходимо введение дополнитель-

ного критерия оценки состояния, включающего не только выпрямленное напряжение, но и ток, протекающий в цепи тяговых двигателей. Одним из таких параметров, вычисляемых на основании информации о мгновенных значениях напряжения и тока, является мгновенная мощность. Однако по величине мгновенной мощности можно судить только о ее направлении. В то же время, наиболее информативным параметром работы преобразователя является интегральный показатель – энергия, передаваемая в цепь выпрямленного тока.

Учитывая конструктивные особенности ВИП и принцип реализации алгоритма зонно-фазового управления, кривая выпрямленного напряжения представляет собой сложную функцию. В идеальном случае без учета коммутационных и послекоммутационных колебаний напряжения, трансформирующихся из тяговой сети, форма выпрямленного напряжения электровоза на любой зоне регулирования может быть представлена в виде кусочно-заданной функции.

В частности, на четвертой зоне регулирования напряжения функция, описывающая кривую имеет вид:

$$u_{d(4)}(\omega t) = \begin{cases} -U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) & 0 < \omega t < \alpha_0 \\ 0 & \alpha_0 \leq \omega t < \alpha_0 + \gamma \\ U_{1-x_1} \cdot \sin(\omega t) & \alpha_0 + \gamma \leq \omega t < \alpha_p \\ U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) & \alpha_p \leq \omega t < \pi + \alpha_0 \\ 0 & \pi + \alpha_0 \leq \omega t < \pi + \alpha_0 + \gamma \\ U_{1-x_1} \cdot \sin(\omega t) & \pi + \alpha_0 + \gamma \leq \omega t < \pi + \alpha_p \\ -U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) & \pi + \alpha_p \leq \omega t < 2\pi + \alpha_0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – угол нерегулируемых импульсов управления в начале каждого полупериода напряжения;  $\gamma$  – длительность сетевой коммутации после подачи сигнала с фазой  $\alpha_0$ ;  $\alpha_p$  – угол регулируемых импульсов управления.

Это выражение может быть представлено единой аналитической зависимостью путем преобразования исходной зависимости с помощью функции Хевисайда [2]:

$$u_{d(4)} = \frac{1}{2} \left[ -U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) + U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) \cdot \text{sign}(t - \alpha_0) + \right. \\ \left. + \frac{3}{4} U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) \cdot \text{sign}(t - (\alpha_0 + \gamma)) + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) \cdot \text{sign}(t - \alpha_p) - \right. \\ \left. - U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) \cdot \text{sign}(t - 180 - \alpha_0) + \right. \\ \left. + \frac{3}{4} U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) \cdot \text{sign}(t - 180 - \alpha_0 - \gamma) - \right. \\ \left. - \frac{1}{4} U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) \cdot \text{sign}(t - 180 - \alpha_p) + \right. \\ \left. + U_{a_1-x_1} \cdot \sin(\omega t) \cdot \text{sign}(t - 360) \right] \quad (2)$$

Где  $\text{sign}(t)$  – кусочно-постоянная функция действительного аргумента.

Такая функция является не дифференцируемой, поэтому применение нелинейного уравнения вида

$$u_d = L_{\text{экв}} \frac{di_d}{dt} + R_{\text{экв}} i_d + e_a(i_d) \quad (3)$$

описывающего связь между током и напряжением в цепи тяговых двигателей, не позволяет вывести аналитическую зависимость выпрямленного тока электровоза от входного напряжения и параметров работы. В приведенном уравнении  $L_{\text{экв}}$  – эквивалентная индуктивность цепи;  $R_{\text{экв}}$  – эквивалентное активное сопротивление.

Нахождение аналитического выражения закона изменения выпрямленного тока также осложняется тем, что противо-ЭДС двигателя НБ-514 является нелинейной функцией, которую можно аппроксимировать выражением [3]:

$$\frac{e_a(i_d)}{n} = 8 \cdot 10^{-7} i_d^3 - 0.0027 \cdot i_d^2 + 2.892 \cdot i_d - 17.547 \quad (4)$$

$n$  – частота вращения ротора двигателя

Учитывая вышеизложенное, для определения аналитического выражения выпрямленного тока за основу взят принцип расчета переходных процессов в электрических цепях с использованием интеграла Дюамеля [4]. В соответствии с ним была определена переходная проводимость  $g(t)$  для каждого участка кривой напряжения, заданного кусочно, с учетом предшествующего режима.

$$g(t) = \frac{1}{R} (1 - e^{-pt}) \quad (5)$$

Используя выражение переходной проводимости для первого участка кривой напряжения, была определена функция тока:

$$i_1(t) = U(0) \cdot g(t) + \int_0^t \frac{dU_1(\tau)}{d\tau}(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

Для всех остальных участков функция тока

$$i_k(t) = i_{k-1}(t_{k-1}) + \Delta U_k \cdot g(t - t_{k-1}) + \\ + \int_{t_{k-1}}^t \frac{dU_k(\tau)}{d\tau}(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (7)$$

Где  $U(0)$  – величина напряжения в начальный момент времени;  $U_k(\tau)$  –

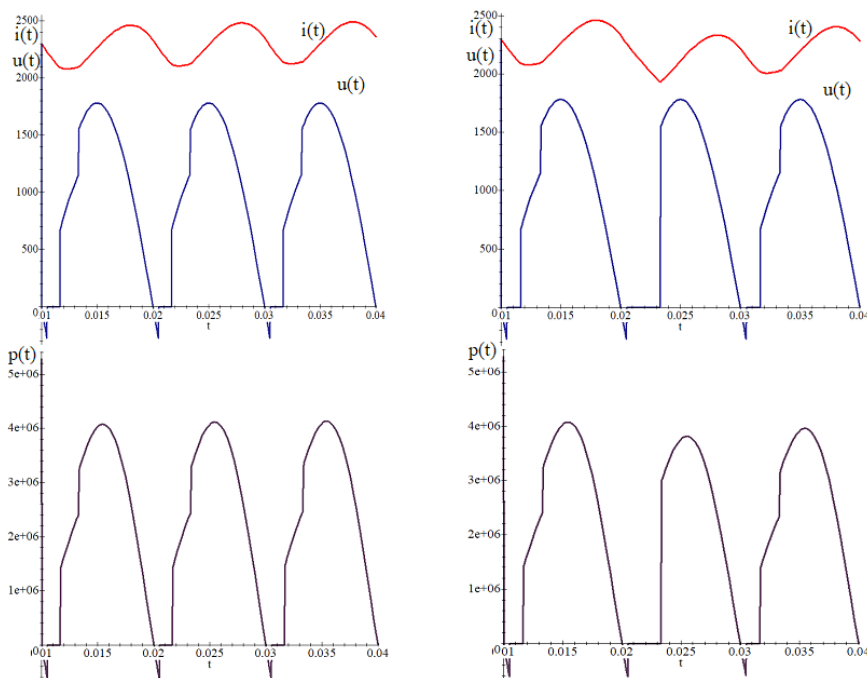


Рис. 2. Диаграммы мгновенных мощностей в нормальном режиме работы ВИП и при обрыве одного из плеч

зависимость напряжения от времени на расчетном интервале,  $\Delta U_k$  – скачок напряжения в момент коммутации на k-ом интервале.

В результате вычисления с помощью интеграла Дюамеля была выведена аналитическая зависимость выпрямленного тока электровоза в режиме тяги. Графический вид этой зависимости для нормального и аварийного режимов (обрыв плеча VS4 на четвертой зоне) представлен на рис.2.

В исправном состоянии силового выпрямителя электромагнитные процессы, происходящие в нем, одинаковы для каждого полупериода напряжения сети. При нарушении штатного алгоритма управления возникает несимметрия процессов в двух соседних полупериодах напряжения. В случае обрыва одного из плеч ВИП происходит снижение не только уровня напряжения  $u_{dr}$ , но и уменьшение среднего значения выпрямленного тока. Поэтому за счет резкого уменьшения энергии за полупериод можно с большей долей вероятности утверждать о нарушении работы плеча преобразователя.

Таким образом, в качестве критерия для выявления аварийного режима ВИП предлагается использовать соотношение потребленной энергии за текущий полупериод сетевого напряжения и энергии за предыдущий полупериод.

На основе анализа резкого изменения величины энергии за половину периода можно делать выводы о наличии или отсутствии сбоя в управлении ВИП. При выборе параметров настройки срабатывания необходимо учитывать возможную динамику рабочего режима. Эти параметры должны быть выбраны таким образом, чтобы штатное изменение угла регулирования не приводило к ложному срабатыванию системы.

Предлагаемый критерий в совокупности с методикой оценки работы ВИП, основанной на анализе ряда Фурье выпрямленного напряжения, повысит в целом надежность алгоритма выявления неисправностей за счет появления дополнительного подтверждающего фактора.

Для оценки возможности применения предлагаемого критерия при отказе тиристорного плеча была

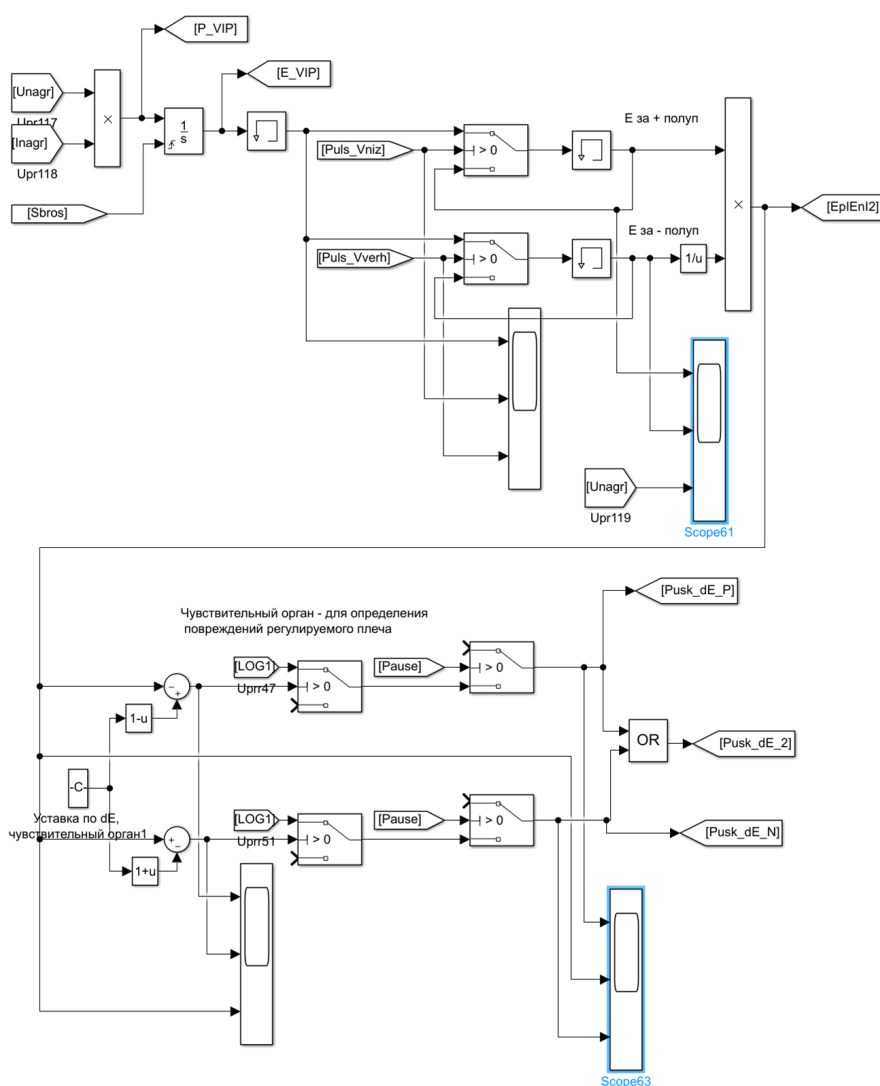


Рис. 3. Блок формирования сигнала по изменению энергии за полупериод напряжения



разработана имитационная модель в программной среде Matlab. Данная модель позволяет фиксировать значения энергии в цепи двигателей непосредственно в конце каждого полупериода выпрямленного напряжения в реальном времени и на основании этого оценивать режим работы преобразователя.

Основой созданной модели является блок формирования сигнала по изменению потребляемой энергии за полупериод. Принцип работы данного блока основан на вычислении значения энергии в цепи двигателей за контрольный полупериод относительно энергии за предыду-

щий, эталонный, полупериод. Схема блока приведена на рис. 3.

В качестве примера на рис. 4 представлены временные диаграммы электромагнитных процессов и динамики потребленной энергии на четвертой зоне регулирования напряжения при потере управления (неоткрытии) тиристорного плеча VS4.

В первом полупериоде напряжения ток нагрузки протекает через плечи ВИП VS4, VS7, а после подачи импульса управления с фазой  $\alpha_p$  на VS2 – через VS2, VS7. Во втором полупериоде ток протекает через плечи VS3, VS8, а после подачи импульса управления с фазой  $\alpha_p$  на VS1 – через

VS1, VS8 (эталонный полупериод). На рисунке 4, б представлено изменение потребленной энергии в эталонном полупериоде.

В следующем полупериоде, в котором задействованы плечи VS2, VS4 и VS7, происходит потеря управления плечом VS4 (промежутком времени 0,105 – 0,115 с). Величина интеграла мгновенной мощности в этот полупериод показана на рис. 4, а (контрольный полупериод).

Из рисунка видно, что при возникновении неисправности ВИП (после пропуска полупериода плечом VS4) в контрольном полупериоде энергоотдача снижается значительно, так как

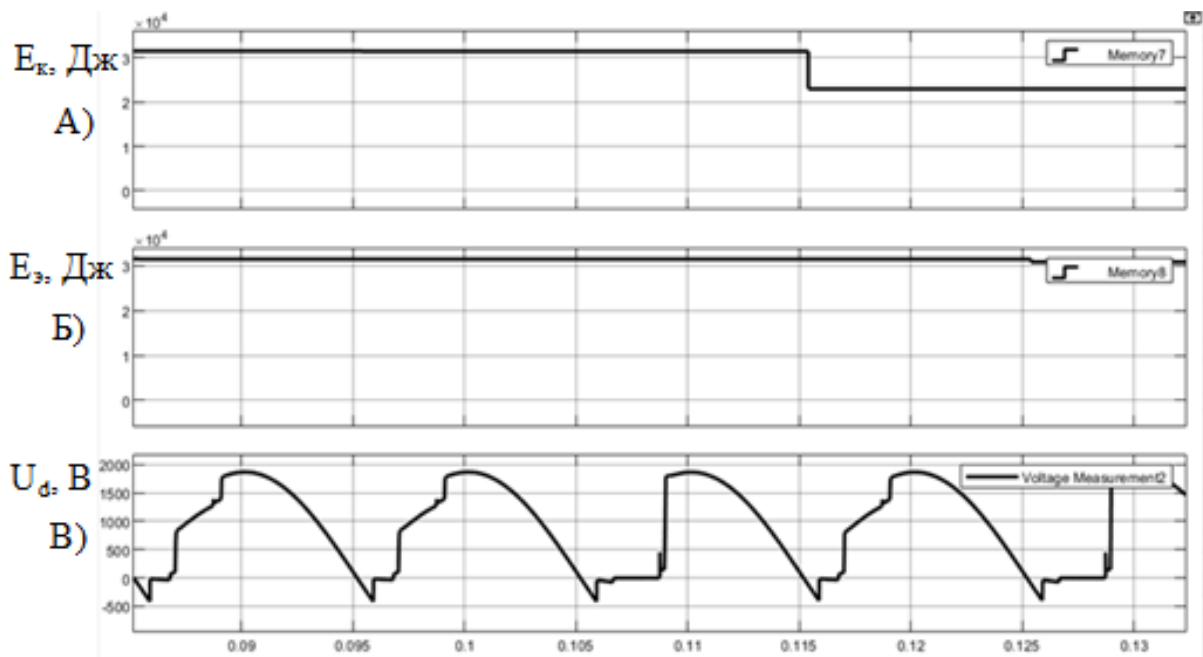


Рис. 4. Диаграммы изменения энергоотдачи при потере управления тиристорным плечом VS4 (данные осциллографа Scope61)

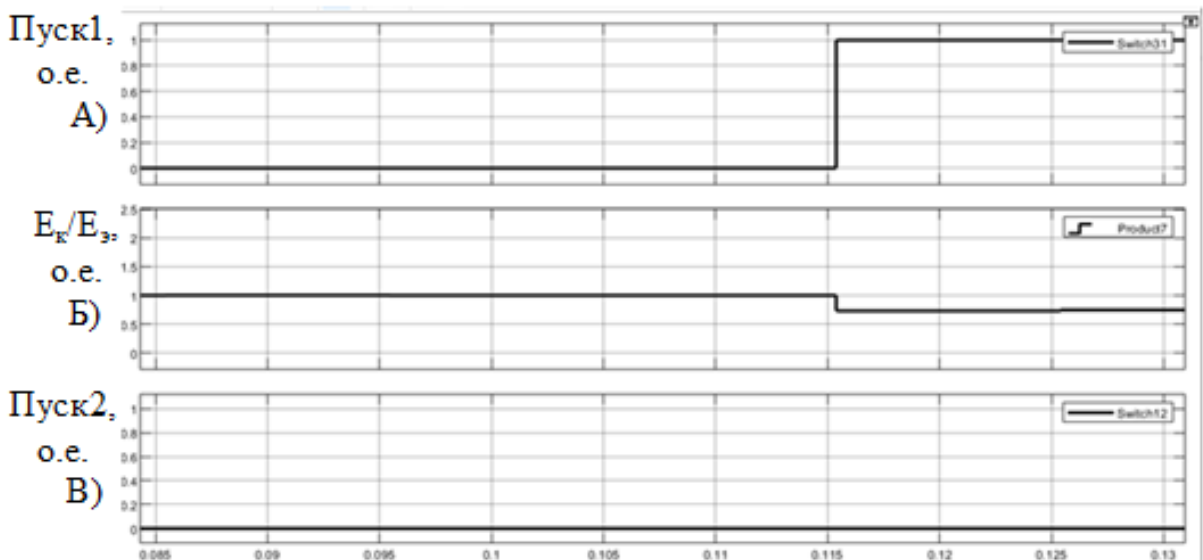


Рис. 5. Диаграммы изменения энергоотдачи при потере управления тиристорным плечом VS4 (данные осциллографа Scope63)

с момента подачи импульсов с фазой  $\alpha_0$  до подачи импульсов с фазой  $\alpha_p$  напряжение на выходных клеммах преобразователя практически равно нулю. Незначительное снижение уровня энергии в следующем за этим полупериоде обусловлено уменьшением величины выпрямленного тока в предыдущем полупериоде.

После получения информации о величине энергии за контрольный период производится определение относительного значения между величинами (рис. 5, б). При сравнении приращения относительной величины энергии в каждом полупериоде напряжения в случае превышения параметра настройки системой выдается сигнал о факте наличия неработающего плеча. Исходя из логики функционирования блока, при превышении заданных порогов срабатывания формируется логический пусковой сигнал (диаграмма, представленная на рис. 5, а).

Моделирование, проведенное на всех зонах регулирования напряжения при различных углах  $\alpha_p$ , показало, что при учете энергетического критерия выявление факта неоткрытия плеча происходит надежно во всех рассмотренных режимах работы.

Таким образом, применение предложенного энергетического критерия совместно с дополнительными показателями, основанными на анализе кривой выпрямленного напряжения, позволит с большей точностью выявить нарушение работы преобразователя.

### **Литература**

1. Система определения повреждений в силовом преобразователе электровоза переменного тока в режиме тяги / Власьевский С.В., Скорик В.Г., Супрун Д.А., Буняева Е.В., Блажнов А.И. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – № 5 (45). – С. 71 – 77.  
2. Волков И. К., Канатников А. Н. Интегральные преобразования и операционное исчисление: Учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 228 с. – (Математика в техническом университете; Вып. XI).

3. Дубровский З.М. Грузовые электро-возы переменного тока: Справочник / З.М. Дубровский, В.И. Попов, Б.А. Тушканов. – М.: Транспорт, 1991. – 471 с.

4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.

### **Скорик Виталий Геннадьевич**

Родился в 1981 году. В 2003 году окончил Дальневосточный государственный университет путей сообщения по специальности «Автоматическое управление электроэнергетическими системами». Кандидат технических наук, доцент. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Снижение влияния электровозов переменного тока с плавным регулированием напряжения на качество электрической энергии в контактной сети». Опыт работы – 18 лет. В настоящее время является заведующим кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС. Удостоен благодарностей Министерства энергетики РФ и Министерства транспорта РФ. Автор более 65 научных работ, имеет 2 патента.

### **Skorik Vitaly Gennadievich**

Born in 1981. In 2003 graduated from the Far Eastern State Transport University majoring in «Automatic Control of the Electric Power Systems». Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor In 2009 defended the dissertation, the subject is «The reduction of the influence of the AC electric locomotives with modulated voltage regulation to the quality of the electrical energy in the the contact system». 18 years work experience. He is the head of the «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics» Department of the Far Eastern State Transport University. Awarded with the note of the acknowledgment of the Ministry of Energy of the Russian Federation and the Ministry of Transport of the Russian Federation. Author of more than 65 scientific papers, has 2 patents.

### **Супрун Демьян Андреевич**

Родился в 1995 году. В 2018 году окончил Дальневосточный государственный университет путей

сообщения, направление подготовки – «Электроэнергетика и электротехника». Опыт работы – 4 года. В настоящее время является преподавателем кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС. Автор 5 научных работ.

### **Suprun Demian Andreevich**

Born in 1995. In 2018 graduated from the Far Eastern State Transport University, majoring in Power «Engineering and Electrical Engineering». 4 years work experience. He is the lecturer of the «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics» Department of the Far Eastern State Transport University. He is the author of the 5 scientific papers.

### **Мальшева Ольга Александровна**

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила Дальневосточный государственный университет путей сообщения по специальности «Электроснабжение железных дорог». Кандидат технических наук. В 2008 году защитила диссертацию по теме «Внутри-системный учет электрической энергии и контроль ее качества на электро-возах переменного тока». Опыт работы – 16 лет. В настоящее время является доцентом кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» ДВГУПС. Имеет благодарственные письма от Министерства энергетики РФ, ОАО «РЖД», Министерства образования и науки Хабаровского края. Автор 42 научных работ.

### **Malysheva Olga Alexandrovna**

Born in 1983. In 2005 graduated from the Far Eastern State Transport University majoring in Railway Power Supply. Ph.D. in Engineering Science In 2008 defended the dissertation, the subject is «The intra-system accounting of the electric energy and the control of its quality on the AC electric locomotives». 16 years work experience. She is the associate professor of the «Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics» Department of the Far Eastern State Transport University. She has notes of acknowledgment from the Ministry of Energy of the Russian Federation, Russian Railways, the Ministry of Education and Science of the Khabarovsk Region. She is the author of the 42 scientific papers.

## Исследование работоспособности электромеханических систем движительно-рулевого комплекса бывшего в длительной эксплуатации обитаемого подводного аппарата

// INVESTIGATION OF THE OPERABILITY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF THE PROPULSION AND STEERING COMPLEX OF A LONG-TERM HABITABLE UNDERWATER VEHICLE //

**Лобынцев В.В., к.т.н.,  
Российский университет  
транспорта (МИИТ), Москва**

**Фокин С.Г.,  
Центр подводных исследований  
Русского географического  
общества, Санкт-Петербург  
Экспедиционный центр МО РФ,  
Москва**

**Кичко С.А.,  
Центр подводных исследований  
Русского географического  
общества, Санкт-Петербург**

**Поляшов А.А.,  
Центр подводных исследований  
Русского географического  
общества, Санкт-Петербург**

**Дураков Д.Н.,  
Национальный  
исследовательский центр  
«Курчатовский институт», Москва**

**Куштан М.И.,  
Национальный  
исследовательский центр  
«Курчатовский институт», Москва**

**Буряков И.Н., к.т.н.,  
Национальный  
исследовательский центр  
«Курчатовский институт», Москва**

**Устинов В.С., к.т.н.,  
Национальный  
исследовательский центр  
«Курчатовский институт», Москва**

Мировой океан занимает две трети поверхности планеты, одна-ко его глубины по сей день остаются малоизученными. Основным препят-

ствием является необходимость длительного пребывания в чужеродной среде под воздействием высокого давления. Вместе с тем проводится активная разработка шельфовых месторождений углеводородов, в транзитных зонах предпринимаются попытки подводной добычи железомарганцевых, никелевых и кобальтовых конкреций, по морскому дну прокладываются силовые и телекоммуникационные кабели, трубопроводы. Необходимость выполнения широкого спектра подводно-технических работ на глубинах от сотен метров и более обусловила создание подводных аппаратов различного класса от телеуправляемых до обитаемых. Их перемещение и маневрирование осуществляется посредством гребного винта, на снижение КПД которого разработчики идут намеренно в целях достижения приемлемых параметров обтекания электропривода, используя совмещенные планетарные редукторы и магнитные муфты вместо сальникового уплотнения вала. Авторами публикации проведено исследование электромеханических характеристик электроприводов и параметров постоянных магнитов в ступицах гребных винтов, по результатам которого дана оценка фактическому состоянию электроприводов движительно-рулевого комплекса обитаемого подводного аппарата C-Explorer 5.8 после многолетнего периода эксплуатации.

Ключевые слова: обитаемый подводный аппарат, магнитная муфта, момент вращения, гребной винт, электромеханическая система привода, движительно-рулевой комплекс.

The world ocean occupies two-thirds of the planet's surface, but its depths remain poorly understood to this day. The main obstacle is the need for a long stay in an alien environment under the influence of high pressure. At the same time, offshore hydrocarbon deposits are being actively developed, attempts are being made to extract ferromanganese, nickel and cobalt nodules in transit zones, power and telecommunication cables and pipelines are being laid along the seabed. The need to perform a wide range of underwater technical work at depths of hundreds of meters or more led to the creation of underwater vehicles of various classes from remote-controlled to habitable. Their movement and maneuvering is carried out by means of a propeller, the developers deliberately reduce the efficiency of which in order to achieve acceptable flow parameters of the electric drive, using combined planetary gearboxes and magnetic couplings instead of a shaft seal. The authors of the publication attempted to assess the actual condition of the electric drives of the propulsion and steering complex of the inhabited underwater vehicle C-Explorer 5.8 after a long period of operation. The study of the electromechanical characteristics of electric drives and the state of permanent magnets in the hubs of propellers was carried out.

Keywords: manned underwater vehicle, magnetic coupling, torque, propeller, electromechanical drive system, propulsion and steering complex.

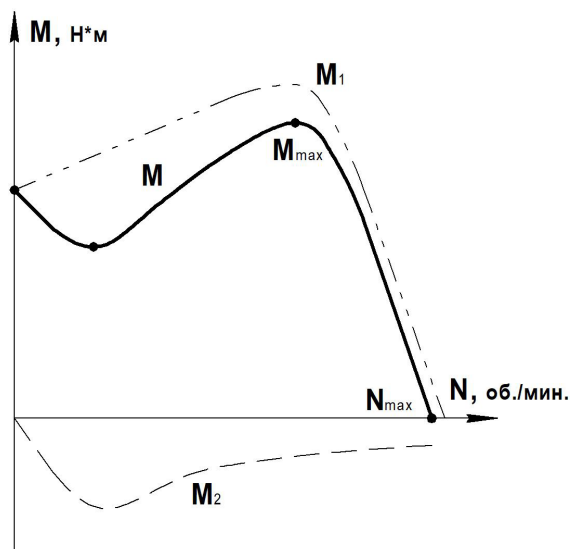


Рис. 1. Общий вид зависимости вращающего момента от частоты вращения синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе

В глубоководной технике использование магнитной муфты для передачи крутящего момента от электродвигателя к гребному винту является популярным техническим решением. Оно позволяет без использования сальниковых уплотнений в области движущихся частей обеспечить герметичность двигателя и его защиту от перегрузки в случае заклинивания гребного винта, а также исключить из конструкции компенсаторы давления. С целью эффективной и безопасной эксплуатации подводных аппаратов необходимо проводить периодический контроль электромеханических систем приводов для оценки текущего состояния их узлов и своевременного выявления неисправностей [1]. Важнейшей характеристикой электромеханических систем приводов является зависимость вращающего момента от частоты

вращения, которая в общем случае для синхронного электродвигателя имеет вид, представленный на рис. 1.

Вращающий момент синхронного двигателя можно представить в виде суммы моментов двух режимов его работы:  $M_1$  асинхронного режима «невозбужденной машины», питающейся от мощной сети с напряжением  $U$ , и  $M_2$  генераторного режима «возбужденной машины», включенной в сеть, напряжение которой равно нулю [2]:

$$M = M_1 + M_2, \quad (1)$$

$$M_1 = Re(U I_f) - r_1 I_f^2 - \frac{r_1}{1-s} I_b^2, \quad (2)$$

где  $I_f$  – ток двигательного режима;  $I_b$  – ток двигательного режима, соответствующий составляющей обратной последовательности;  $r_1$  – активное сопротивление фазы.

$$M_2 = -E_0^2 \frac{(1-s)[(1-s)^2 x_d^2 + r_1^2]}{[(1-s)^2 x_d x_q + r_1^2]^2}, \quad (3)$$

где  $E_0$  – ЭДС генератора;  $s$  – скольжение;  $x_d, x_q$  – индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям соответственно.

Объект исследования – движительно-рулевой комплекс обитаемого подводного аппарата C-Explorer 5.8 (рис. 2 а, б) производства U-Boat Worx, который был выпущен в 2013 году и эксплуатировался до 2016

года. По причине четырехлетнего простоя обитаемого подводного аппарата (ОПА) потребовалось проведение качественной оценки текущего состояния его ключевых узлов, в том числе движительно-рулевого комплекса, включающего в себя 6 двигателей производства Technadune: 2 маршевых, 2 вертикальных (Model 2020) и 2 лаговых (Model 1080) [3, 4]. Питание двигателей осуществляет литий-ионная аккумуляторная батарея, состоящая из 4-х групп аккумуляторов, причем каждая группа отвечает за собственный движитель или пару таковых. Принципиально движитель состоит из электродвигателя с постоянными магнитами на роторе, совмещенного с ним планетарного редуктора и магнитной муфты, передающей вращающий момент на гребной винт. Ответной частью магнитной муфты является ступица гребного винта, которая содержит систему постоянных магнитов, собранных по схеме Хальбаха, в связи с чем основными задачами исследования являлись:

- измерение вращающих моментов на гребных винтах;
- измерение индукции магнитного поля постоянных магнитов в их ступицах.

Для проведения измерений крутящего момента и частоты вращения использовался датчик Lorenz Messtechnik DR-2212 с диапазоном определяемых значений 0,1÷20000 Н·м с ценой деления 0,1 Н·м, классом точности 0,1 и дискретизацией фиксации показаний 5 Гц. Присоединение датчика к винту осуществлялось посредством цангового зажима через измерительную муфту roba-ds

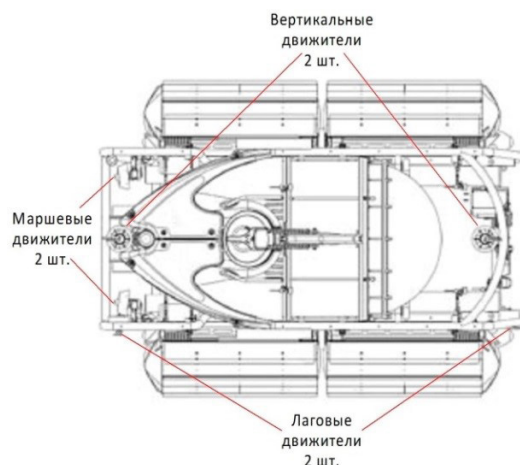


Рис. 2. ОПА C-Explorer 5.8: внешний вид (а) и вид сверху (б)

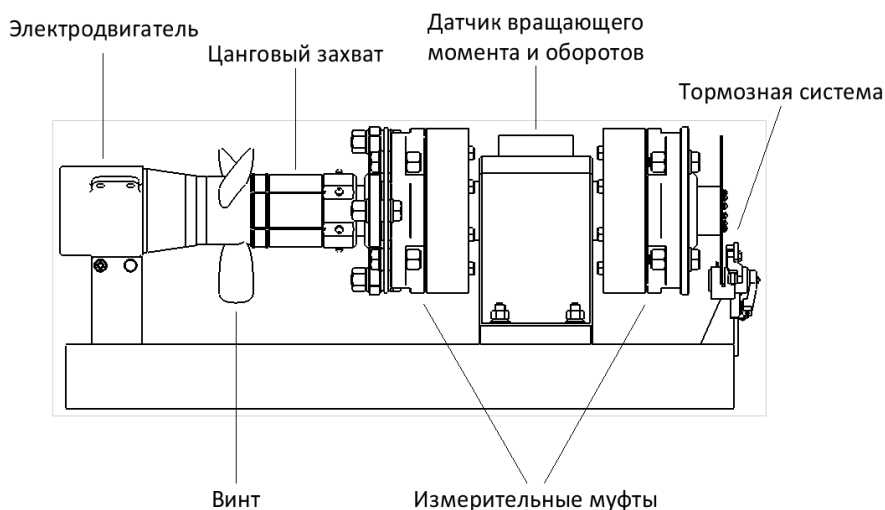


Рис. 3. Схема измерительного стенда

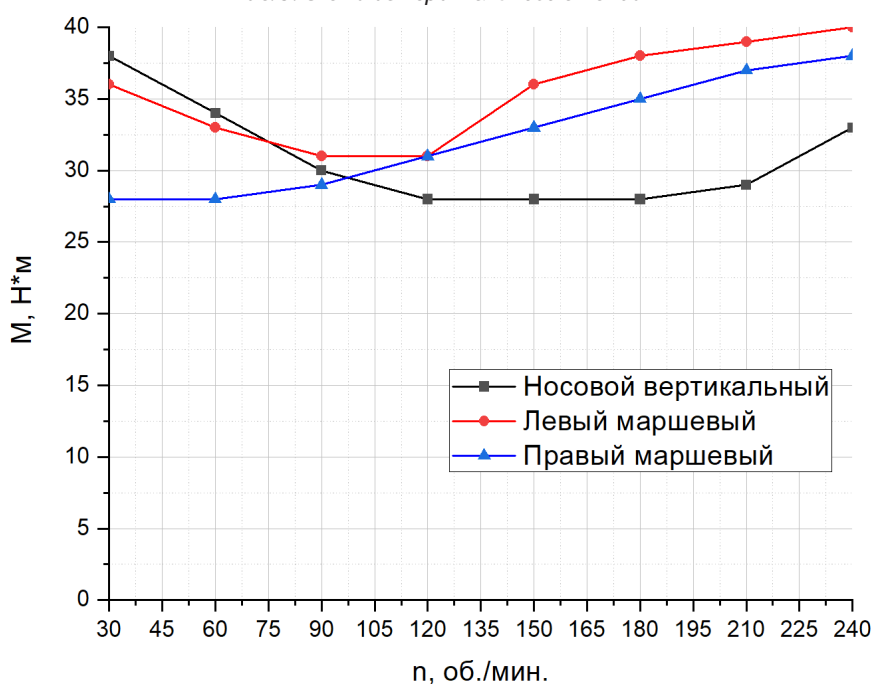


Рис. 4. Измерение момента срыва магнитной муфты при различной частоте вращения ступицы гребного винта

500 951.021 производства Maug, которая при помощи гибких элементов обеспечивала компенсацию возможного эксцентриситета. На рис. 3 показано размещение на станине электродвигателя с винтом и датчика крутящего момента с установленным на его противоположной стороне тормозного диска, выполняющего функцию регулируемой механической нагрузки. Питание электродвигателя выполнялось от бортовой аккумуляторной батареи ОПА, а управление – от бортовой системы управления, позволяющей плавно регулировать частоту вращения в рабочем диапазоне.

Согласно заводской маркировке двигателей, диапазон частот вра-

щения гребного винта составляет 0÷320 об/мин. Однако в ходе испытаний предельная частота вращения винтов составила  $\approx 300$  об/мин. При этом бортовая система управления стабильно без срыва поддерживала заданную частоту вращения лишь в диапазоне 0÷240 об./мин. По этой причине характеристика момента срыва магнитных муфт от частоты вращения была снята для диапазона 0÷240 об/мин. с шагом 30 об/мин. По достижении заданной частоты вращения с помощью тормозной системы винту сообщался момент сопротивления, что приводило к остановке двигателя или срыву магнитной муфты. Таким образом, фиксировался пре-

дельный крутящий момент электро-механической системы при заданной частоте вращения винта.

Одна из аккумуляторных групп, отвечающая за питание пары лаговых двигателей, автоматически отключалась системой управления аккумуляторной батареи ввиду крайне низкого выходного напряжения. Магнитная муфта кормового вертикального винта была заклинена. В этой связи измерения были проведены лишь для трех двигателей: носового вертикального, левого и правого маршевых.

По результатам измерений построены характерные зависимости величины крутящего момента при срыве магнитной муфты от частоты вращения ступицы гребного винта (рис. 4). Как видно из рисунка, наиболее близкой к классической (рис. 1) является зависимость  $M_{\text{лм}}(n)$  левого маршевого движителя, что свидетельствует об удовлетворительном состоянии его электро-механической системы.

Точка минимума кривой момента срыва магнитной муфты правого маршевого движителя смещена в сторону минимальной частоты вращения. Вероятнее всего, это свидетельствует о более пологом характере его кривой составляющей момента  $M_2$  генераторного режима «возбужденной машины», что указывает на вероятную деградацию постоянных магнитов на роторе электродвигателя. Кривая момента срыва магнитной муфты носового вертикального движителя имеет наиболее пологий характер, а ее точка минимума смещена в сторону большей частоты вращения. Эти особенности могут также быть объяснены снижением качества магнитной передачи в результате деградации постоянных магнитов в муфте.

Визуально-измерительный контроль фактического состояния ступиц гребных винтов выполнялся с помощью миллитесламетра ТП2-2У после демонтажа последних. В ходе измерений гребной винт устанавливался в патрон на шпинделе токарного станка, а щуп миллитесламетра закреплялся в резцедержателе суппорта, как показано на рис. 5. Затем щуп прибора в поперечном направлении приводился суп-



Рис. 5. Оборудование для измерения магнитной индукции магнитов в ступице гребного винта

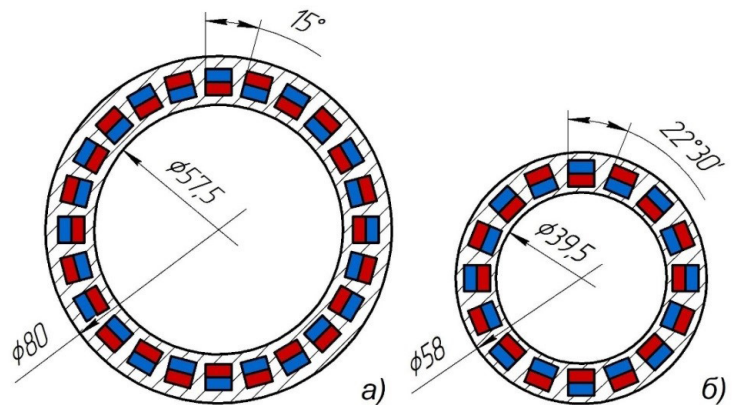


Рис. 6. Поперечное сечение ступиц большого (а) и малого (б) гребных винтов

портом в положение, при котором его датчик находился максимально близко к внутренней поверхности ступицы винта, при этом не касаясь ее. При перемещении щупа в продольном направлении при помощи суппорта определялось положение, в котором показания магнитной индукции принимают наибольшие по модулю значения. Путем поворота патрона определялось положение с пиковым показанием индукции магнитного поля. Таким образом снималось показание индукции магнитного поля для первого магнита в ряду. В дальнейшем путем вращения патрона находились другие пиковые значения индукции магнитного поля для остальных магнитов в ряду, после чего цикл измерений повторялся для следующего ряда.

Шесть гребных винтов ОПА С-Explorer 5.8 можно разделить на два типоразмера. На маршевых и вертикальных движителях установлены большие винты, а на лаговых – малые. В процессе измерений было установлено, что каждая ступица большого винта содержит 3 ряда магнитов по 24 штуки в каждом, а малого – 2 ряда по 16 штук. Поперечное сечение ступиц большого и малого гребных винтов показано на рис. 6, а и б.

В результате проведенных измерений для каждой ступицы были построены зависимости пиков индукции магнитного поля, взятых по модулю от угла поворота винта, представленные на рис. 7 а, б, в, г, д, е. Фактическое состояние магнитных систем оценивалось не только по величине индукции магнитного поля,

но и равномерности его распределения на поверхности внутренней апертуры ступицы гребного винта. Так что на основании данных по рис. 7, а и б можно констатировать удовлетворительное состояние магнитов в ступицах левого и правого маршевого винтов. Данное обстоятельство подтверждает означенную выше гипотезу о деградации магнитов на роторе электропривода правого маршевого движителя, также подтвержденную опытом эксплуатации ОПА, при движении которого прямолинейным курсом аппарат постоянно уведило вправо с учетом одинакового положения рукояток прямого хода.

Величины индукции магнитного поля постоянных магнитов ступицы кормового вертикального винта (рис. 7, в) несколько ниже по сравнению с аналогичным параметром для левого и правого маршевого винтов, но при этом он распределен по окружности ступицы достаточно равномерно, чего нельзя сказать применительно к результатам, полученным для носового вертикального винта (рис. 7, г). На рис. 7, г отчетливо видно, что разброс величины индукции магнитного поля для магнитов в одном ряду достигает  $\approx 50$  мТл, что подтверждает заявленный при анализе кривых измерений гипотезу о снижении качества магнитной передачи в результате деградации магнитов. Последняя могла быть вызвана перегревом магнитной муфты и/или агрессивным воздействием окружающей среды, например, повышенным содержанием сероводорода в морской воде

по месту погружения ввиду высокого сродства неодима к водороду. Во избежание деградации магнитов системы NdFeB при проектировании аналогичных комплексов целесообразно прибегнуть к использованию магнитов на основе более стойких к внешним воздействиям материалов с меньшими коэффициентами потерь остаточной индукции и коэрцитивной силы [5 – 8].

Зависимости пиков индукции магнитного поля, взятые по модулю от угла поворота винта, представленные на рис. 7 д и е, имеют довольно равномерный характер. Средние значения магнитной индукции выше средних значений, полученных для остальных винтов, что, вероятнее всего, связано с тем, что стенка ступицы малого винта тоньше стенки ступицы большого.

Полученные результаты ставят под сомнение возможность эксплуатации исследованного обитаемого подводного аппарата без капитального ремонта. Выявлены неисправности в узлах отдельных движителей. Необходимо проведение аналогичного исследования остальных движителей, состояния валов магнитных муфт и роторов электроприводов движителей.

## Выводы

1. Предложенная методика измерений позволила эффективно оценить текущее состояние электро-механических систем движителей обитаемого подводного аппарата, а также локализовать неисправности отдельных узлов и агрегатов.

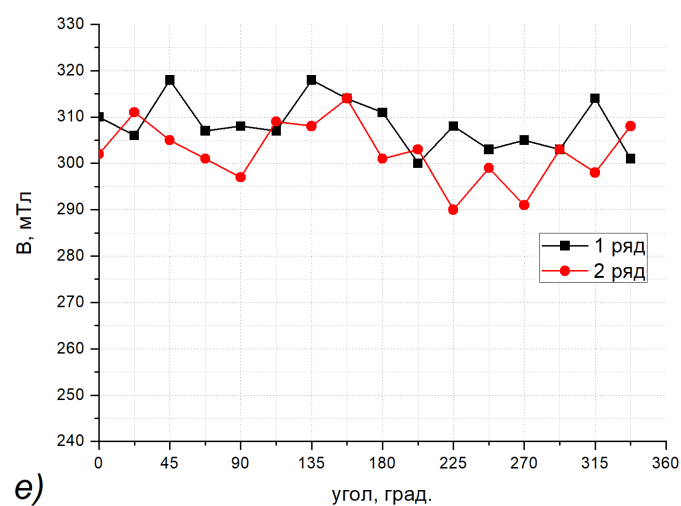
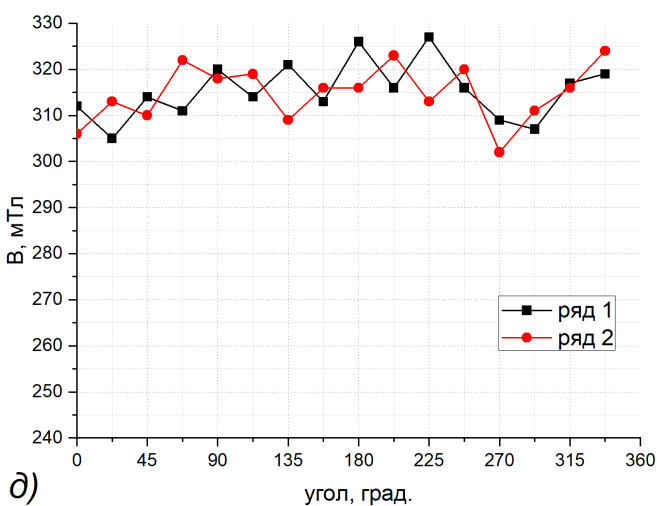
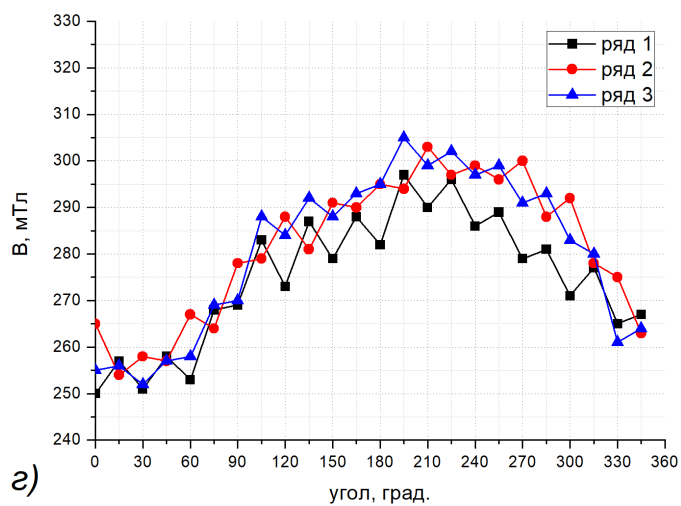
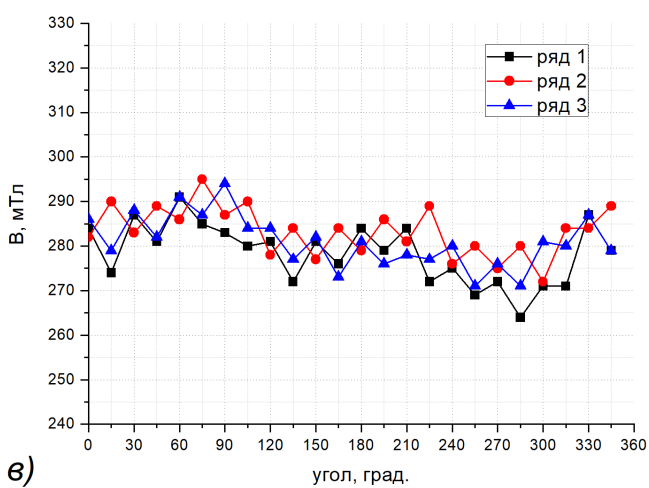
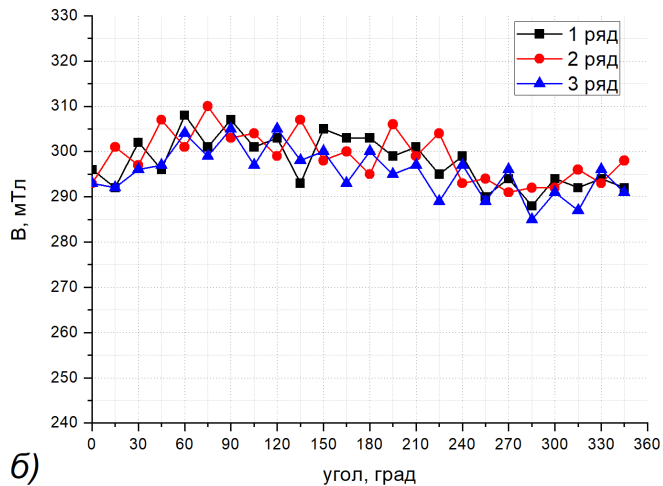
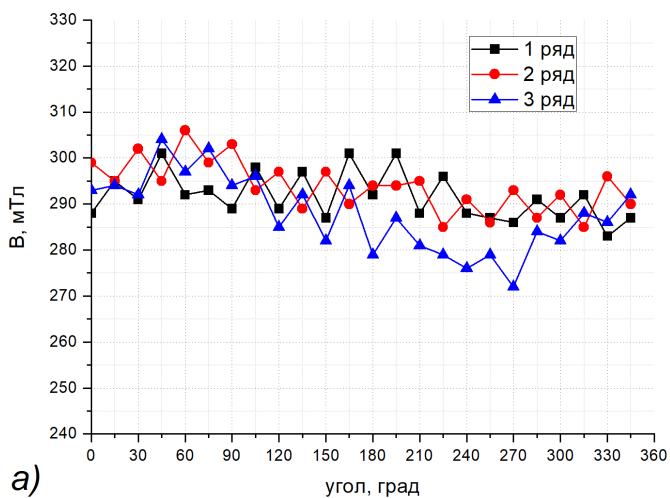


Рис. 7. Зависимости пиков индукции магнитного поля, взятых по модулю, от угла поворота ступицы винта: а) – левый маршевый, б) – правый маршевый, в) – кормовой вертикальный, г) – носовой вертикальный, д) – кормовой лаговой, е) – носовой лаговой

2. Полученные результаты показали уязвимости магнитной муфты и обратили внимание на необходимость более тщательного выбора постоянных магнитов с точки зрения устойчивости к воздействиям внешних факторов и долговечности эксплуатационных характеристик по параметрам индукции магнитного поля и коэрцитивной силы.

3. Для уточнения полученных результатов необходимы исследования остальных движителей, состояния валов магнитных муфт и роторов электроприводов движителей, а также на аналогичных по конструкции бывших в эксплуатации движителях с целью набора статистики.

### **Литература**

1. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. НД № 2-020101-012. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2021.

2. Электрические машины с постоянными магнитами / под ред. А.Н. Ларионова // М.: Энергия, 1964. – 480 с.

3. URL: <https://tecnadyne.com/wp-content/uploads/2017/06/Model-2020-Brochure-1.pdf>

4. URL: <https://tecnadyne.com/wp-content/uploads/2019/04/Model-1080-Data.pdf>

5. Xiujuan J. Structural, magnetic and microstructural studies of composition-modified Sm-Co ribbons: dissertation in support of candidature for a technical degree. – Lincoln, Nebraska, 2014.

6. Walmer M. S., Chen C. H., Walmer M. H. A new class of Sm-TM magnets for operating temperatures up to 550/spl deg/C //IEEE transactions on magnetics. – 2000. – V. 36. – №. 5. – P. 3376-3381.

7. An S. et al. Magnetic properties of anisotropic bonded NdFeB/SmCo permanent magnets //AIP Advances. – 2019. – V. 9. – №. 12. – P. 125146.

8. Gutfleisch O. et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient //Advanced materials. – 2011. – V. 23. – №. 7. – P. 821-842.

#### **Дураков Дмитрий Николаевич**

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Московский государствен-

ный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Опыт работы – 9 лет. В настоящее время является научным сотрудником Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Имеет 11 научных публикаций.

#### **Durakov Dmitry Nikolaevich**

Was born in 1989. In 2012 he graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MSURE) majoring in Power Supply of Electric Railways. He has 9-year work experience. At the moment he is a Researcher at the «Kurchatov Institute» National Research Center. He has 11 scientific papers.

#### **Лобынцев Владимир Васильевич**

Родился в 1980 году. В 2003 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Сверхпроводниковые ограничители токов короткого замыкания для систем тягового электроснабжения». Опыт работы – 22 года. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» в Российском университете транспорта (МИИТ). Имеет 40 научных публикаций в рецензируемых журналах, 2 патента на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Lobyntsev Vladimir Vasilyevich**

Was born in 1980. In 2003 he graduated from the Moscow State University of Railway Engineering (MSURE) majoring in Power Supply of Electric Railways. He is Candidate of Technical Sciences. In 2009 he defended his dissertation on the topic «Superconductor short-circuit current limiter for traction power supply systems». 22-year work experience. At the moment he works as the Assistant professor of the Transport Electric Power Engineering Department of the Russian University of Transport (MSURE). He has 40 scientific publications in peer-reviewed journals,

2 invention patents, 1 computer program registration certificate.

#### **Устинов Василий Сергеевич**

Родился в 1957 году. В 1980 году окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана по специальности «Энергетические машины и установки». Кандидат технических наук. В 2001 году защитил диссертацию по спецтеematике. Опыт работы – 41 год. В настоящее время работает заместителем директора по специальным проектам Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Имеет 30 научных трудов, 4 патента на изобретения. Заслуженный работник атомной промышленности РФ, награжден Медалью ордена «За заслуги перед Отечеством II», Лауреат премии им. И.В. Курчатова, имеет Нагрудный знак за заслуги в развитии атомного ледокольного флота и Орден «За заслуги перед отечеством IV степени».

#### **Ustinov Vasily Sergeevich**

Was born in 1957. In 1980 he graduated from the Moscow Higher Technical School named after N.E. Bauman majoring in Power Machines and Installations. He is Candidate of Technical Sciences. In 2001 he defended his dissertation on special subjects. He has 41 years' work experience. At the moment he works as th Deputy Director for Special Projects of the «Kurchatov Institute» National Research Center. He has 30 scientific papers, 4 patents for inventions. He is the Honored Worker of the Nuclear Industry of the Russian Federation, awarded the Medal of the Order of Merit for the Motherland II, I.V. Kurchatov Award Holder, he has the Order of Merit for Country of the IV Degree for the Development of nuclear icebreaking fleet Honor badge.

#### **Фокин Сергей Георгиевич**

Родился в 1989 году. Окончил экономический факультет Санкт-Петербургского государственного университета по специальности «Экономист-математик». В 2011 году получил диплом программы Executive MBA на базе Института подготовки специалистов оборонно-промышленного комплекса и



инфраструктурных отраслей Национального исследовательского университета Высшая школа экономики (НИУ ВШЭ) по направлению «Управление реформируемым предприятием ОПК». Опыт работы – более 10 лет. В настоящее время работает исполнителем директором Центра подводных исследований Русского географического общества – заместителем начальника Экспедиционного центра Министерства обороны Российской Федерации. Имеет 1 научную публикацию.

**Fokin Sergey Georgievich**

Was born in 1989. Graduated from the Faculty of Economics of St. Petersburg State University majoring in Economics and Mathematics. In 2011 he completed Executive MBA in the Institute for the Training of Specialists in the Military-Industrial Complex and Infrastructural Industries of the National Research University Higher School of Economics (NRU HSE) majoring in «Management of a reformed defense industry enterprise». He has 10-year work experience. At the moment he works as the Executive Director of the Underwater Research Center of the Russian Geographical Society – Deputy Head of the Expeditionary Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation. He has 1 scientific publication.

**Поляшов Александр Александрович**

Родился в 1986 году. В 2009 году окончил Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова «Военмех» по специальности «Информационно-измерительная техника и технологии». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает ведущим инженером проектно-инженерного отдела Центра подводных исследований Русского географического общества. Имеет 1 научную публикацию, 2 патента, 2 программы для ЭВМ, 2 технологии (ноу-хау).

**Polyashov Alexander Alexandrovich**

Was born in 1986. In 2009 he graduated from the Baltic State Technical University, named after D.F. Ustinov majoring in «Information-measuring equipment and

technologies». He has 13-year work experience. At the moment he works as the Leading engineer of the Design and engineering Department of the Underwater Research Center of the Russian Geographical Society. He has 1 scientific publication, 2 patents, 2 computer programs, 2 technologies (know-how).

**Кичко Степан Александрович**

Родился в 1988 году. В 2012 году окончил Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова «Военмех» по специальности «Боеприпасы и средства поражения». Опыт работы – 12 лет. В настоящее время работает начальником проектно-инженерного отдела Центра подводных исследований Русского географического общества. Имеет 1 патент, 1 программу для ЭВМ, 2 технологии (ноу-хау).

**Kichko Stepan Aleksandrovich**

Was born in 1988. In 2012 he graduated from the Baltic State Technical University, named after D.F. Ustinov majoring in «Ammunition and Weapons». He has 12-year work experience. At the moment he works as the Head of the Design and Engineering Department of the Underwater Research Center of the Russian Geographical Society. Has 1 patent, 1 computer program, 2 technologies (know-how).

**Куштан Максимилиан Игоревич**

Родился в 1993 году. Является студентом вечернего отделения Российского университета транспорта (МИИТ). Опыт работы – 4 года. В настоящее время работает лаборантом-исследователем Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Имеет 4 научных публикации.

**Kushtan Maximilian Igorevich**

Was born in 1993. He is the student of the Evening studies department of the Russian University of Transport (MSURE). 4-year work experience. At the moment he works as Laboratory researcher at the «Kurchatov Institute» National Research Center. He has 4 scientific publications.

**Буряков Илья Николаевич**

Родился в 1972 году. В 1995 году окончил Московский государственный авиационный институт (технический университет) (МАИ) по специальности «Системы автоматизированного проектирования», квалификация – инженер-системотехник. Кандидат технических наук. В 1998 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование углерод-углеродных композиционных фрикционных материалов с помощью компьютерного моделирования». С 2016 по 2020 г.г. работал генеральным директором АО «Спецмагнит» (производство магнитов и магнитных систем). В настоящее время является старшим научным сотрудником Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Автор 28 печатных работ и 4 патентов.

**Buryakov Ilya Nikolaevich**

Was born in 1972. In 1995 he graduated from the Moscow State Aviation Institute (Technical University) (MAI) majoring in Computer-Aided Design Systems, qualification systems engineer. He is Candidate of Technical Sciences. In 1998 he defended his dissertation on the topic «Improvement of carbon-carbon composite friction materials using computer simulation». 2016 to 2020 worked as the General Director of AO «Spetsmagnit» (manufacture of the magnets and magnetic systems). At the moment he is Senior Researcher of the «Kurchatov Institute» National Research Center. Author of 28 publications and 4 patents.

## Фильтрокомпенсирующая установка для повышения пропускной способности и снижения потерь мощности в тяговой сети железных дорог

// FILTER-COMPENSATING INSTALLATION FOR INCREASING BANDWIDTH CAPABILITY AND REDUCE POWER LOSSES IN TRACTION NETWORK OF RAILWAYS //

**Серебряков А.С., д.т.н., профессор, Филиал Самарского государственного университета путей сообщения, Нижний Новгород**

**Герман Л.А., д.т.н., профессор, Филиал Самарского государственного университета путей сообщения, Нижний Новгород**

**Дулепов Д.Е., к.т.н., Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Нижний Новгород**

**Осокин В.Л., к.т.н., Филиал Самарского государственного университета путей сообщения, Нижний Новгород**

Для повышения пропускной способности электрифицированных железных дорог и снижения потерь мощности в тяговой сети на посту секционирования включаются двухступенчатые фильтрокомпенсирующие установки (ФКУ) поперечной емкостной компенсации. При увеличении тяговой нагрузки, когда в тяговой сети появляются тяжеловесные поезда, включается наибольшая мощность ФКУ, а при снижении тяговой нагрузки мощность ФКУ уменьшается.

Для этого ФКУ выполняется с тиристорным ключом (ТК) для бесконтактного переключения двух секций. При этом ТК выполняет две

функции, во-первых, для быстрого без перенапряжений переключения секций: он обеспечивает включение двух последовательно соединенных секций для уменьшения генерируемой мощности и включение одной основной секции для увеличения мощности ФКУ. Во-вторых, для ограничения бросков тока и напряжения в тяговой сети за счёт того, что напряжение на ФКУ повышается постепенно, поэтапно по 400-500 В путем кратковременного фазового регулирования тиристорного ключа. Приведена запатентованная схема автоматического управления тиристорным ключом. Технико-экономический эффект состоит в том, что с помощью одной фильтрокомпенсирующей установки с двумя индуктивно-емкостными секциями LC повышается напряжение до требуемого значения и при этом исключаются опасные броски напряжения в тяговой сети при регулировании мощности ФКУ. Перспективно модернизировать все существующие компенсирующие установки на постах секционирования с переводом их в переключаемые фильтрокомпенсирующие ФКУ.

Ключевые слова: фильтрокомпенсирующие установки, пропускная способность, потери мощности, фазовое регулирование, броски тока и напряжения, посты секционирования.

In order to increase the bandwidth capacity of electrified railways and reduce power losses in traction network, two-stage filter-compensating installations (FCI) of transverse capacitive compensation are switched on at the sectioning post. With increase of traction load, when heavy trains appear in traction network, the maximum power of FCI is turned on, and with decrease in traction load, the power of FCI decreases.

For this purpose, FCI is performed with thyristor switch (TS) for non-contact switching of two sections. In this case, the TS performs two functions, firstly, for fast section switching without overvoltage: it ensures the inclusion of two series-connected sections to reduce the generated power and the inclusion of one main section to increase the power of FCI. Secondly, to limit current and voltage surges in traction network due to the fact that the voltage on FCI increases gradually in 400-500 V by short-term phase control of thyristor switch. The patented scheme of automatic control of thyristor switch is given. The technical and economic effect consists in the fact that with the help of one filter-compensating installation with two inductive-capacitive sections LC voltage rises to required value and at the same time dangerous voltage surges in traction network are excluded when regulating the power of FCI. It is promising to upgrade all existing compensating installations at sectioning posts with their transfer to switchable filter-compensating FCI.

Keywords: Filter-compensating installations, bandwidth capability, power losses, phase control, current and voltage surges, sectioning posts.

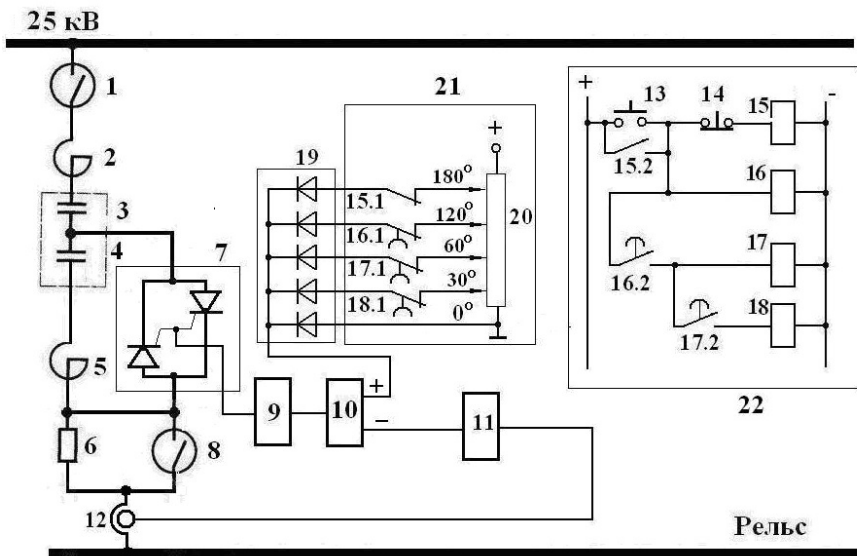


Рис. 1. Принципиальная схема двухступенчатой ФКУ в тяговой сети переменного тока системы 25 кВ и 2х25 кВ

Железнодорожный транспорт России ежегодно потребляет около 5% вырабатываемой в стране электроэнергии, из которых на тягу поездов расходуется свыше 30 млрд кВт/ч. Одной из приоритетных задач Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» до 2030 года является снижение энергоёмкости перевозочного процесса и удельных затрат энергопотребления на тягу поездов. Энергетическая стратегия предполагает дальнейшее усовершенствование технических решений и технологий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности ОАО «РЖД». В частности, на железных дорогах, электрифицированных на переменном токе, необходимо обеспечить заданную пропускную способность, соблюдать установленные показатели качества электроэнергии и потребляемой реактивной мощности на основе использования установок компенсации реактивной мощности.

Наряду с задачей компенсировать реактивную мощность и уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети установки поперечной ёмкостной компенсации могут фильтровать высшие гармоники. Если установка компенсации выполняет дополнительно и роль фильтра высших гармоник в тяговой сети, то в цепь последовательно с конденсатором  $C$  включают реактор с индуктивностью  $L$  и установку в этом случае называют фильтрокомпен-

сирующей установкой (ФКУ). Кроме этого ФКУ должна повышать напряжение в тяговой сети при прохождении тяжёловесных поездов. Поэтому ФКУ должна иметь, по крайней мере, два значения реактивной мощности и соответственно два значения ёмкости. Когда проходят тяжёловесные поезда и нагрузка в тяговой сети максимальная, ёмкость и мощность установки компенсации реактивной мощности также должны быть максимальными. Когда нагрузка в тяговой сети становится минимальной, то реактивная мощность и ёмкость должны быть минимальными.

Авторам известно давно разработанное положение, что по технико-экономическим соображениям вместо регулируемых установок целесообразно применять малоступенчатые установки компенсации [1,2].

Для доказательства этого уже более 7 лет на Горьковской успешно работает переключаемая фильтрокомпенсирующая установка, комплексно решающая задачи:

- повышение пропускной способности и качества электроэнергии;
- снижение потерь мощности в тяговой сети [3].

Принципиальная схема предложенной авторами двухступенчатой ФКУ приведена на рис. 1. В режиме максимальной мощности включен только один конденсатор (основная батарея конденсаторов), а второй конденсатор (дополнительная батарея конденсаторов) зашунтирован

бесконтактным ключом. В режиме минимальной мощности в установке компенсации последовательно включены оба конденсатора (бесконтактный ключ разомкнут). Резистор вводят в работу только при включении всей установки в работу.

Регулируемые установки поперечной ёмкостной компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока описаны в [1, 2, 3]. В [4] представлена переключаемая фильтрокомпенсирующая установка (ФКУ) с двумя последовательно включенными нерегулируемой и переключаемой секциями (в каждой секции реактор с батареей конденсаторов, секции LC), причем переключаемая секция зашунтирована биполярным тиристором. Для изменения мощности переключаемой ФКУ шунтируют или расшунтируют переключаемую секцию выключателем, при этом в [6] указано, что этот выключатель может выполняться синхронизированным, например, с использованием биполярного тиристора, как это сделано, в частности, в [5, 6, 7]. При шунтировке ФКУ напряжение в тяговой сети повышается броском, что может неблагоприятно сказаться на работе электровозов в тяговой сети.

Разберем требования ГОСТ [8] на условия работы электровоза в нестационарных режимах. Все оборудование электровоза должно сохранять свою работоспособность и обеспечивать выполнение всех режимов работы при нестационарных значениях напряжения (при скачках напряжения, внешних и внутренних перенапряжениях). Работоспособность электровоза должна быть обеспечена в следующих нестационарных режимах: при скачкообразном увеличении и уменьшении питающего напряжения на токоприемнике электровоза между максимальным и минимальным длительным значением за время 0,02 сек. Таким образом, анализ требований ГОСТ показывает, что в настоящее время нет конкретных условий на допустимые значения бросков напряжения на токоприемнике электровоза.

Однако по опытным данным специалисты считают, что, во-первых, более опасно для электровоза резкое повышение напряжения на токо-

приемнике, чем резкое понижение, и, во-вторых, броски напряжения до 500В допустимы для электровозов. Однако с ростом тяговых нагрузок растут и мощности ФКУ. При включении ФКУ мощностью 5 – 6 Мвар напряжение в тяговой сети на посту секционирования повышается примерно на 1500В. Если принять максимальный бросок напряжения, например, в 1500В, то следовало бы повышать напряжение на ФКУ в три этапа по 500В, то есть поднять напряжение до 500В, затем через некоторое время до 1000В, и далее через некоторое время до 1500В. Таким образом, цель в предложенной авторами разработке – повышать с помощью тиристора напряжение в тяговой сети поэтапно, например, не сразу до 1500В, а с помощью фазового регулирования повышать поэтапно по 500В. Возможно повышение напряжения и с другим шагом, например, 400В, как это выполнено на рис. 1.

Для пояснения работы двухступенчатой ФКУ (рис. 1) введены следующие обозначения:

- 1 – главный выключатель;
- 2 – реактор первой секции;
- 3 – конденсаторная батарея первой секции;
- 4 – конденсаторная батарея второй секции;
- 5 – реактор второй секции;
- 6 – демпфирующий резистор;
- 7 – биполярный тиристор с управляющим электродом;
- 8 – выключатель, шунтирующий демпфирующий резистор;
- 9 – блок дифференцирования;
- 10 – компаратор;
- 11 – блок измерения фазы тока;
- 12 – трансформатор тока;
- 13 – кнопка ВКЛ шунтирования второй секции для увеличения емкости ФКУ;
- 14 – кнопка ВЫКЛ расшунтирования второй секции для уменьшения емкости ФКУ;
- 15 – реле фиксации начального угла включения 120 градусов;
- 15.1 и 15.2 – размыкающий и замыкающий контакты реле 15;
- 16, 17, 18 – первое, второе и третье реле времени с задержкой на срабатывание;
- 16.1, 17.1, 18.1 – размыкающие контакты реле 16, 17 и 18 с задержкой времени на срабатывание;

16.2 и 17.2 – замыкающие контакты реле 16 и 17 с задержкой времени на срабатывание;

19 – блок диодов;

20 – потенциометр задания напряжений, определяющих углы задержки времени включения биполярного тиристора;

21 блок задания углов задержки на фиксированные моменты времени включения биполярного тиристора;

22 – блок трех реле времени.

Переключаемая ФКУ по рис. 1 работает следующим образом. Пусть в исходном состоянии ФКУ работает с включенными двумя секциями 2 – 3 и 4 – 5, трансформатором тока 12 и при отключенном биполярном тиристоре 7. Принимаем максимальное повышение напряжения в 1600В, будем поэтапно включать биполярный тиристор с повышением напряжения на ФКУ по 400В. Тогда при установленных фиксированных задержках в 120°, 60°, 30° и 0° напряжение на ФКУ будет повышаться на 400В, 800В, 1200В и 1600В. При подаче команды ВКЛ 13 через размыкающийся контакт ОТКЛ 14 срабатывает реле 15, и через замыкающийся контакт 15.2 встает на «самоподхват» реле 15, и при этом размыкается его контакт 15.1, и напряжение от потенциометра 20 через размыкающийся контакт 16.1 поступает на второй вход компаратора 10. На первый вход компаратора 10 поступает от блока измерения фазы тока 11 сигнал с напряжением, пропорциональным фазе тока ФКУ. Когда на первом входе компаратора напряжение будет превышать значение, соответствующее фазе тока 120°, сработает компаратор 10 и через блок дифференцирования 9 включит биполярный тиристор 7. На реле времени 16 (а также на реле времени 17 и 18) устанавливаем выдержку времени 3 сек, поэтому в течение 3 сек биполярный тиристор 7 будет включаться с задержкой по фазе в 120°, и тогда напряжение на ФКУ повысится на 400В.

Далее по истечении 3 сек от момента нажатия кнопки ВКЛ замкнется замыкающий контакт 16.2, будет подано напряжение на реле времени 17, и разомкнется размыкающий контакт 16.1. Напряжение от по-

тенциометра 20, соответствующее фазе 60°, поступает через размыкающий контакт 17.1 и через диод 19 на второй вход компаратора 10, и когда напряжение на первом входе компаратора будет превышать соответствующее напряжению при 60° блока измерения фазы тока 11, сработает компаратор 10 и через блок дифференцирования 9 включит биполярный тиристор 7. Напряжение на ФКУ повышается на 800В и действует в течение 3 сек.

Далее замыкается замыкающий контакт 17.2, подается напряжение на реле 18 и размыкается контакт 17.1. Напряжение от потенциометра 20, соответствующее фазе 30°, поступает через размыкающий контакт 18.1 и через диод 19 на второй вход компаратора 10, и когда напряжение на первом входе компаратора 10 будет превышать соответствующее напряжению при 30° блока измерения фазы тока 11, сработает компаратор 10 и через блок дифференцирования 9 включит биполярный тиристор.

Напряжение на ФКУ повышает на 1200В и действует в течение 3 сек, после чего размыкается размыкающий контакт 18.1, и напряжение, равное нулю от потенциометра 20, соответствующее фазе тока 0°, поступает через диод 19 на второй вход компаратора 10. И когда напряжение на первом входе компаратора 10 будет превышать нулевое значение (фаза тока станет больше 0°), сработает компаратор 10 и через блок дифференцирования 9 включит биполярный тиристор 7 без задержки по времени. В итоге напряжение на ФКУ повышается на 1600В. Таким образом, напряжение в тяговой сети повышается на 1600В не броском, а поэтапно в течение 3 x 3 = 9 сек, что не нарушит нормальную работу электровоза.

Обычно переключение мощности ФКУ происходит автоматически при работе автоматики ФКУ, тогда запуск биполярного тиристора происходит не от кнопки ВКЛ, а от соответствующей автоматики (на схеме не указано).

Отметим еще один важный аспект применения ФКУ на постах секционирования. Проблема повышения пропускной способности железной

дороги достаточно эффективно решается путем включения регулируемой ФКУ на посту секционирования. Сейчас, когда на наиболее ответственных постах секционирования включена типовая установка поперечной емкостной компенсации, достаточно просто ее модернизировать в регулируемую установку ФКУ с добавлением дополнительной секции конденсаторов и тиристорного ключа. Такая установка будет комплексно решать вопросы повышения пропускной способности участка железной дороги, снижения потерь мощности и потерь напряжения, а также фильтрации высших гармонических тока и напряжения.

Технико-экономический эффект состоит в том, что с помощью одной фильтрокомпенсирующей установки с двумя индуктивно-емкостными секциями LC повышается напряжение до требуемого значения и при этом исключаются опасные броски напряжения в тяговой сети при регулировании мощности ФКУ. Отличительная особенность установки – сравнительно низкая стоимость, уменьшенные потери мощности в тяговой сети и уменьшенные затраты на обслуживание по сравнению, например, с применяемым регулируемым генератором реактивной мощности. Перспективно модернизировать все существующие компенсирующие установки на постах секционирования с переводом их в переключаемые фильтрокомпенсирующие ФКУ.

### Выводы

1. Предложен упрощенный вариант регулируемой фильтрокомпенсирующей установки, отличающейся пониженными капитальными вложениями и эксплуатационными расходами и выполняющей главные задачи в тяговом электроснабжении: поддержание заданной пропускной способности и снижение потери мощности в тяговой сети.

2. Применение тиристорного ключа в переключаемой фильтрокомпенсирующей установке решило проблему снижения бросков тока и перенапряжений при переключении секций ФКУ.

3. Целесообразно модернизировать все компенсирующие уста-

новки на постах секционирования с преобразованием их в переключаемые ФКУ с тиристорным ключом.

### Литература

1. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983
2. Каялов Г.М., Ковалев И.Н. Расчет компенсации реактивных нагрузок регулируемыми конденсаторными батареями. – Электричество, 1971 №8, с. 19 – 25
3. Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Монография. Княгинино НГИЭУ 2017, 402 с.
4. Герман Л.А., Серебряков А.С., Осокин В.Л., Якунин Д.В. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка в тяговой сети переменного тока. Вестник ВНИИЖТ 2020, Т.79 №2 с. 80 – 87.
5. Патент №2704023 от 21.03.2019. Трехступенчатая фильтрокомпенсирующая установка тяговой сети переменного тока (Герман Л.А. и др.). Оpubл. 23.10.2019. Бюлл. № 30.
6. Патент № 2475912 от 09.03.2011. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока. (Серебряков А.С. и др.). Оpubл. 10.02.2013. Бюлл. № 5.
7. Патент №2739329 от 06.08.2020. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка (Серебряков А.С. и др.). Оpubл. 22.12.2020. Бюлл. № 36.
8. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования.

### Серебряков Александр Сергеевич

Родился в 1939 году. В 1961 году окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». Доктор технических наук, профессор. Защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». В настоящее время работает профессором кафедры «Техника и технологии железнодорожно-

го транспорта» филиала Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС) в г. Нижнем Новгороде. Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Автор более 350 научных работ, в том числе 10 книг. Имеет более 50 авторских свидетельств СССР и патентов РФ на изобретения.

### Serebryakov Alexander Sergeevich

Was born in 1939. In 1961 he graduated from Nizhny Novgorod State Technical University after the name of R. E. Alekseev on specialty «Electrification of industrial enterprises and unites». He is a doctor of technical sciences, professor. He defended his doctor's dissertation with topic «Methods and means of diagnostics of insulation of electrical machines and devices of its protection». Now he is the professor of the chair «Technique and technology of railway transport» at branch of Samara StateTransport University in Nizhny Novgorod. He is corresponding member of the Russian academy of electrotechnical sciences. He is author of more than 350 scientific papers, including 10 books. He has more than 50 certificates of authorship and patents for inventions.

### Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта» филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, член-корреспондент Российской академии транспорта. Автор более 390 научных трудов, 100 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

### German Leonid Abramovich

Was born in 1937. He has graduated Moscow Institute of

Transport Engineers by specialty «Engineer routes – electrician» (1959). He has defended the dissertation by the theme «Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation». He is a doctor of technical sciences, professor of the Department of «Engineering and technology of railway transport» branch of the Samara state University of Railways in Nizhny Novgorod. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 390 scientific works, 100 inventions and patents. He has 2 government awards.

**Дулепов Дмитрий Евгеньевич**

Родился в 1986 году. В 2008 году окончил Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. Кандидат технических наук, доцент. В 2013 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Переходные процессы в регулируемых установках емкостной компенсации систем тягового электроснабжения переменного тока». Опыт работы 14 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрификация и ав-

томатизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГИЭУ). Опубликовал 75 печатных работ, 1 монографию и 1 учебник для вузов, получил 19 патентов на изобретения и полезные модели.

**Dulepov Dmitry Evgenievich**

Was born in 1986. In 2008 he graduated from the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. In 2013 he defended his dissertation on the topic "Transients in adjustable capacitive compensation units for AC traction power supply systems". He has 14-year work experience. At the moment he works as the Head of the Electrification and Automation Department of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics (NNSUEE). Published 75 printed papers 1 monograph and 1 textbook for universities, received 19 patents for inventions and utility models.

**Осокин Владимир Леонидович**

Родился в 1976 году. В 1998 году окончил Нижегородскую государ-

ственную сельскохозяйственную академию. Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение эффективности функционирования электрических подогревателей воды путем разработки стенда для их тестирования». В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГИЭУ). Опубликовал 50 печатных работ, 3 монографии, получил 12 патентов на изобретение.

**Osokin Vladimir Leonidovich**

Was born in 1976. In 1998 he graduated from Nizhny Novgorod State Agricultural Academy. He is a Candidate of Technical Sciences, associated professor. In 2011 he defended his Candidate's Dissertation with topic «Increasing the efficiency of electric water heaters by developing its test facility». Now he is a Chief of the chair «Electrification and automation» at Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. He published 50 scientific papers, 3 monographs, 12 patents for invention.

## Новые системы изоляции тяговых двигателей

// NEW TRACTION MOTOR INSULATION SYSTEMS //

**Рыжова Е.Л., к.т.н.,  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I,  
Санкт-Петербург**

В статье рассматривается актуальность применения новой системы изоляции электрических машин тягового подвижного состава. Анализируя инновационные направления применения диэлектрических материалов, автор отмечает, что одной из причин отказов узлов электроподвижного состава является пробой изоляции и межвитковое замыкание обмотки якоря тягового электродвигателя. Приводятся технические решения при производстве, основные параметры, показатели надежности и долговечности, а также достоинства

рассматриваемых видов изоляции отечественных производителей для электрических машин тягового подвижного состава. Сделан вывод о целесообразности применения приведенной новой системы изоляции тяговых двигателей.

**Ключевые слова:** электроизоляционные материалы, наноэлектроизоляция, тяговый электродвигатель, подвижной состав, пробой изоляции, класс нагревостойкости, стеклослюдо-содержащие материалы.

The article discusses the relevance of the application of a new insulation system for electric traction rolling stock machines. Analyzing innovative directions of application of dielectric materials, the author notes that one of the reasons for failures of electric rolling stock components is the breakdown of insulation and inter-turn closure of the armature winding of the traction motor. The technical solutions in production, the main parameters, reliability and durability indicators, as well as the advantages of the considered types of insulation of domestic manufacturers for electric traction rolling stock machines are given. The conclusion is made about the expediency of using the above new traction engine insulation system.

**Keywords:** electrical insulation materials, nanoelectroisolation, traction electric motor, rolling stock, insulation breakdown, heat resistance class, glass-containing materials.

Сегодня при стремительно развивающемся прогрессе техники и технологий появляются новые материалы, которые используются в различных сферах жизни человека, в том числе в эксплуатации ходовой части локомотивов.

Одними из важнейших компонентов электрических машин являются электроизоляционные материалы (ЭИМ) и системы изоляции, определяющие эксплуатационную надежность электрооборудования. В связи с этим уделяется большое внимание разработкам новых ЭИМ в системах изоляции и технологиям их переработки.

### **Инновационные направления при применении диэлектрических материалов**

В первую очередь речь идет об инновационных диэлектрических материалах, поскольку изоляция токоведущих элементов и электропроводки является фундаментальным направлением обеспечения безопасности пользователей и технического персонала. Наибольшее распространение сегодня получили различные виды компаундов:

- затвердевающие – защита наносится на поверхность токоведущего элемента, после чего он затвердевает и приобретает свои рабочие характеристики;
- жидкие – не меняют своего агрегатного состояния в процессе работы;
- заливочные – по своим характеристикам аналогичны затвердевающим;
- пропиточные – наиболее распространены, так как не содержат растворители;
- вакуумные – используются там, где в межэлектродном пространстве возникновение электрического тока физически невозможно, так как там нет электродов и ионов для переноса зарядов. Следует отметить, что такие системы изоляции довольно непрактичны и дороги, но их перспективность очевидна.

В последнее время все более популярными и востребованными становятся так называемые наноматериалы, то есть полимерные материалы с толщиной слоя 5-250 мкм. Современная наноэлектрическая изоляция обладает очень привле-

кательными физическими, механическими и химическими свойствами:

- устойчивость к внешним агрессивным химическим средам;
- устойчивость к кратковременным и значительным температурным перепадам;
- продолжительный срок эксплуатации;
- высокие прочностные свойства, устойчивость к механическим, в том числе ударным, воздействиям;
- минимальные размеры, что имеет важное значение для электроники.

Однако есть очень принципиальный аспект, который в определенной степени ограничивает использование наноизолирующих материалов – экологическая составляющая. Если полимер не утилизировать должным образом, то он является сильным загрязнителем окружающей среды из-за долгого разложения.

Таким образом, благодаря инновационным технологиям материалы для электроизоляции совершенствуются, разрабатываются новые, в том числе применяемые в тяговых электродвигателях (ТЭД) подвижного состава.

При эксплуатации подвижного состава в различных климатических зонах тяговые машины, являющиеся наиболее нагруженным оборудованием локомотивов, подвержены комплексному воздействию тепловых, электрических и механических факторов. Работа ТЭД в условиях влажности, низких температур и при значительных их перепадах приводит к ускорению старения изоляции, ухудшению объемного и поверхностного сопротивления изоляции и увеличению вероятности ее пробоя [1, с. 10].

Существующий технологический процесс ремонта ТЭД предусматривает измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками, испытания изоляции на электрическую прочность относительно корпуса машины и между обмотками [2, с. 18, 24].

#### **Требования к электроизоляционным материалам тяговых электродвигателей**

В последние годы усилия технических специалистов были сосредоточены на разработке и применении новых ЭИМ для систем изоляции ТЭД локомотивов, которые работают при высоких нагрузках и потерях мощности. Изоляция должна обладать высокой теплопроводностью, так как служит для отвода тепла от меди, а также выдерживать высокую температуру и ее перепады. В процессе эксплуатации изоляция подвергается деформации под действием вибрации, а также ударным механическим воздействиям из-за прохождения по обмотке больших токов при пусках и торможениях электрических машин.

Создатели тяговых двигателей локомотивов стремятся использовать изоляцию, обладающую повышенными значениями электрической прочности и способную противостоять эксплуатационным воздействиям, что является важным условием обеспечения надежности и долговечности применяемых электрических машин. Повышение уровня термостойкости и свойств изоляционных систем позволяет улучшить удельные характеристики электрических машин, увеличив срок их службы при повышении электрических, механических и тепловых нагрузок на изоляцию [3, с. 51, 52].

При создании электроизоляционных материалов их объединяют в

общие системы по соответствующему классу нагревостойкости. И если ранее конструкторы электрических машин использовали системы изоляции класса нагревостойкости F, то сегодня ставится задача максимально использовать свойства новых систем изоляции класса нагревостойкости H при возрастании мощности электродвигателей и увеличении нагрева их обмоток.

#### **Новая система изоляции электрических машин**

С учетом того, что основной причиной низкой теплопроводности обмоток электродвигателя является наличие локальных воздушных прослоек между медью и изоляцией, основное внимание при улучшении электроизоляции направлено на создание новых составов для вакуум-нагнетательной пропитки, которая используется в технологии сухих непропитанных лент, а также пропиточный компаунд и пропитанные ленты для изоляции пропитанных лент. При этом в качестве дополнительных материалов используются упрочненный профильный стеклопластик, герметики, стеклоткани, а также покрывные эмали, полупроводящие ленты, нагревостойкий стеклотекстолит.

Сегодня применение новой системы изоляции электрических машин тягового подвижного состава позволяет использовать новые материалы. Комплекс изоляционных материалов (класс нагревостойкости F) на основе стеклослюдосодержащих материалов предназначен для вакуум-нагнетательной пропитки. От традиционно используемых сухих лент они отличаются повышенным содержанием связующего вещества, что обеспечивает данному типу изоляции высокую механическую прочность, а также минимальное повреждение сложных конфигураций обмоток тяговых двигателей. Для пропитки изоляции обмотки данными лентами используется пропиточный компаунд на основе ненасыщенного полиэфира, который по технологичности и электрофизическим параметрам не уступает эпоксидному компаунду, а по времени застывания значительно превосходит его.

Пропитанная слюдяная высокотехнологичная, гибкая и эластичная лента толщиной 0,08 мм пригодна для витковой изоляции и представ-

ляет собой композицию из слюдяной бумаги, стеклоткани и полиэтилен-рефталатной пленки, пропитанной компаундом. Подходит для ручной или механизированной изоляции обмоток любой конфигурации. После отверждения в предварительно спрессованном состоянии он показывает высокие электрофизические характеристики. При проверке качества ленты на якорных катушках, а также для витковой и основной изоляции главного и дополнительного полюсов тяговых двигателей все обмотки успешно прошли испытания на межвитковое замыкание и электрическую прочность. Лента, пропитанная стеклослюдой с полиимидной пленкой, содержит от 25 до 35% связующего вещества (пропиточного компаунда) и предназначена для вакуум-нагнетательной пропитки. Эта лента может использоваться в качестве витковой и основной изоляции обмоток якоря и компенсационных катушек по классу термостойкости H. Компаунд, представляющий собой раствор ненасыщенного олигоэфирциануратимида и эпоксидной смолы в олигоэфиракрилате, обладает высокими диэлектрическими характеристиками и цементирующей способностью, низкой вязкостью при температуре 35–50°C, высокой термостабильностью.

Комплекс изоляционных материалов (класс нагревостойкости C), изготавливаемый на основе стеклослюдосодержащих материалов и пропиточного компаунда для вакуум-нагнетательной пропитки обмоток, обладает высокой жизнеспособностью.

Проводимый после разработки новой системы изоляции тяговых двигателей комплекс экспериментальных исследований включает в себя оценку электрофизических и технологических параметров всех электроизоляционных материалов, а также многофакторные испытания обмоток. После разработки новой системы изоляции тяговых двигателей экспериментальные исследования включают оценку электрических и технологических параметров всех электроизоляционных материалов, многофакторные испытания обмоток, а также влияние электрического поля, температуры, механических и других эксплуатационных нагрузок на уровень изменения основных характеристик новой изоля-



ционной системы электродвигателя.

Проведенные электрические испытания системы изоляции обмоток тяговых двигателей электропоезда, состоящей из ленты на основе стеклослюдосодержащих материалов и пропиточного компаунда для вакуум-нагнетательной пропитки, показали ее высокие характеристики как в исходном состоянии, так и после термического старения при температуре 200 °С в течение 160 часов. Показатели при испытаниях на длительную электрическую прочность были очень высокими [4, с. 1 – 5].

Система изоляции класса нагревостойкости F (155°С) на основе слюдяной ленты и пропиточного компаунда была внедрена при капитальном ремонте с заменой изоляции двигателей тепловозов и электровозов практически на всех заводах ОАО «РЖД». Данная система изоляции повторно прошла ресурсные испытания, которые подтвердили класс нагревостойкости F и высокий ресурс изоляции. Дополнительно были проведены испытания пропиточного компаунда. Они подтвердили высокий уровень его технических характеристик, по которым компаунд не уступает, а по ряду показателей превосходит используемый в настоящее время пропиточный компаунд. В настоящее время завершены работы по модификации данного компаунда с целью повышения ремонтно-пригодности ТЭД. Одновременно с этим была разработана система изоляции ТЭД класса нагревостойкости H на основе слюдяной ленты при разработке проекта модернизации ТЭД, которые в настоящее время находятся в эксплуатации. Данных о выходе из строя модернизированных ТЭД нет.

В рамках проекта по разработке скоростного электроподвижного состава нового поколения были проведены работы по разработке новых систем изоляции класса нагревостойкости 200°С для асинхронного ТЭД. Оптимальным решением явилась разработка слюдяных лент, содержащих в своем составе полиимидную пленку. В качестве пропиточного состава использовался кремнийорганический компаунд, который по нагревостойкости, влагостойкости и электрическим характеристикам находится на высоком уровне и широко применяется ведущими зарубежными компаниями. Проведенные предварительные

испытания разработанной системы изоляции ТЭД класса нагревостойкости H (200°С) на основе слюдяной ленты и пропиточного компаунда показали, что новая система изоляции в целом обладает высокими электропрочностными свойствами, устойчивостью к воздействию старящих и климатических факторов. Она превосходит используемую в серийном производстве ТЭД систему аналогичного класса по всему комплексу исследованных в рамках выполненных испытаний показателей и может быть использована при производстве асинхронных ТЭД.

Таким образом, новые материалы для изоляции обмоток тяговых двигателей локомотивов включают весь спектр изоляции по классам нагревостойкости от F до C. Высокие электрофизические и механические свойства материалов выпускаемых предприятием, а также их стойкость к высоким температурам позволяет значительно повысить надежность изоляции электрических машин [5, с. 8, 9].

#### Заключение

Приведенные данные позволили раскрыть преимущества новой системы изоляции электрических машин тягового подвижного состава. Использование нонноизоляции обеспечит возможность более надежной, многофункциональной, безопасной и эффективной работы электрических машин по сравнению с использованием традиционных систем изоляции тяговых двигателей.

#### Литература

- 1 Тяговые электрические двигатели электровозов / В.И. Бочаров, В.И. Захаров, Л.Ф. Коломейцев, Г.И. Колпахчан, М.А. Комаровский, В.Г. Наймушин, В.И. Седов, И.И. Талья, В.Г. Щербаков, В.П. Янов; Под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 672 с., ил.
2. Технологическая инструкция на депо-ремонт ТЭД типа ТЛ-2К.
3. Долгова А. В. К вопросу о совершенствовании технологии ремонта тяговых электродвигателей локомотивов / А. В. Долгова, П. К. Шкодун. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2010. – № 1-2 (13). – Т. 1. – С. 51-54. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/13/1064/> (дата обращения: 15.11.2021).
4. Биржин А. П. Новые электроизоля-

ционные материалы ЗАО «Электроизолит» // Газета «Энергетика и промышленность России» // – 2005. – № 5 (57) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/epr/> (дата обращения: 15.11.2021).
- 5. Папков А.В., Мельниченко А.П., Пак В.М., Куимов И.Е. Современные электроизоляционные материалы для систем изоляции вращающихся электрических машин // «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» // – 2009. – № 03 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 2009\_3.pdf (booksite.ru) (дата обращения: 15.11.2021).

#### Рыжова Елена Львовна

Родилась в 1967 году. В 2000 году окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Кандидат технических наук, доцент. В 2006 году защитила диссертацию по теме «Создание компьютерного тренажера-имитатора для обучения безопасному приему труда». Опыт работы – 25 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Удостоена благодарности Министра транспорта Российской Федерации. Является автором 67 публикаций, из них 18 учебно-методических и 49 научных работ.

#### Ryzhova Elena Lvovna

Was born in 1967. In 2000 she graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in Automation, Telemechanics and Communications on Railway Transport. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. In 2006 she defended her dissertation on the topic "Computersimulator-simulator creation for the teaching safe labor practices". He has 25-year work experience. At the moment she works as the Assistant Professor of the Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department of the St. Petersburg State Transport University. She was awarded the Note of acknowledgment of the Minister of Transport of the Russian Federation. He is the author of 67 publications, including 18 educational and methodical and 49 scientific papers.

## Совершенствование системы контроля изоляции тяговых двигателей локомотивов

### // IMPROVEMENT OF THE INSULATION CONTROL SYSTEM FOR TRACTION MOTORS OF LOCOMOTIVES //

**Проход Д.И.,**  
**АО «ВНИКТИ»,**  
**г. Коломна**

**Никитин В.В.,**  
**Петербургский университет**  
**путей сообщения Императора**  
**Александра I,**  
**г. Санкт-Петербург**

**Евстафьев А.М.,**  
**Петербургский университет**  
**путей сообщения Императора**  
**Александра I,**  
**г. Санкт-Петербург**

*Анализ статистических данных по неисправностям локомотивов показывает, что значительное количество отказов возникает в результате неисправностей системы изоляции тяговых двигателей. В настоящее время нормативными*

*документами ОАО «РЖД» регламентированы следующие виды испытаний изоляции тяговых двигателей: измерение сопротивления изоляции, испытания повышенным напряжением и испытания на пробой. В настоящей статье предлагается расширение номенклатуры параметров изоляции, контролируемых в процессе эксплуатации, за счет измерения коэффициента абсорбции, возвратного напряжения, тангенса угла диэлектрических потерь и емкости изоляции. Даны результаты мониторинга дополнительных параметров изоляции тяговых двигателей в ходе эксплуатационных испытаний, сформулированы критерии отбраковки тяговых двигателей по состоянию изоляции.*

*Ключевые слова:* электрическая изоляция, тяговый двигатель, локомотив.

*An analysis of statistical data on locomotive failures shows that a significant number of failures occur as a result of failures in the traction motor insulation system. Currently, Russian Railways regulations regulate the following types of traction motor insulation tests: insulation resistance measurement, high voltage tests, and breakdown tests. This article proposes to expand the range of insulation parameters controlled during operation by measuring the absorption coefficient, return voltage, dielectric loss tangent, and insulation capacitance. The results of monitoring additional insulation parameters of traction motors during operational tests are given, criteria for rejecting traction motors according to the state of insulation are formulated.*

*Keywords:* electrical insulation, traction motor, locomotive.

#### Введение

Тяговые двигатели (ТЭД) подвижного состава железных дорог являются электрическими машинами, предназначенными для работы с высокими электромагнитными, тепловыми и механическими нагрузками. В условиях эксплуатации ТЭД локомотивов подвержены воздействию ударных нагрузок, влаги, пыли, перепадов температуры. Это определяет частые случаи выхода ТЭД из строя, в том числе в пути следования с поездами, что приводит к сбоям в графике движения поездов, финансовым и имиджевым потерям эксплуатирующих организаций. По имеющимся данным около 75% ТЭД локомотивов приходится менять из-за возникающих отказов раньше срока очередного среднего или капитального ремонта, при этом около 60% случаев – это отказы ТЭД на

линии. Основными причинами отказов ТЭД являются низкое сопротивление изоляции, пробой изоляции, переброс и круговой огонь по коллектору. В наибольшей степени отказам подвержены тяговые двигатели распространенных серий ЭД-118, ЭД-133, применяющиеся на локомотивах серий 2ТЭ10, 2ТЭ116, при этом отказы по причине низкого сопротивления изоляции обмотки якоря и межвитковым замыканиям в обмотке составляют более 40% случаев.

В настоящее время способами контроля текущего состояния изоляции ТЭД в эксплуатации, регламентированными действующими нормативными документами [1–3], являются измерение сопротивления изоляции мегаомметром, испытание изоляции на пробой на высоковольтной установке и контроль повышенным напряжением.

Измерение сопротивления изоляции выполняется переносным прибором при всех видах технического обслуживания и текущего ремонта, дает представление о текущем состоянии изоляции, позволяет выявлять грубые дефекты изоляции, но не позволяет оценивать остаточный ресурс изоляции. Кроме этого, сопротивление изоляции является параметром, наиболее восприимчивым к внешним воздействиям, которые могут резко изменяться за короткое время, в первую очередь влажности.

Испытания изоляции на пробой и испытания повышенным напряжением выполняются на стационарных установках при приемо-сдаточных испытаниях после прохождения ТЭД текущего ремонта ТР-3, среднего и капитального ремонта. Недостатками этих способов контроля состояния изоляции являются снижение ее ресурса при испытаниях на пробой,

а также невозможность оперативного контроля текущего состояния изоляции в процессе эксплуатации при выполнении технических обслуживаний и текущих ремонтов малого объема.

Указанные обстоятельства свидетельствуют о необходимости совершенствования системы контроля изоляции ТЭД по следующим направлениям: развитие системы неразрушающего контроля изоляции путем расширения номенклатуры параметров, контролируемых в процессе эксплуатации; дополнение контроля текущего состояния изоляции прогнозированием ее остаточного ресурса; аппаратное обеспечение технологического процесса контроля мобильными средствами диагностики, позволяющими оперативно измерять расширенную совокупность параметров изоляции; создание базы данных по каждому ТЭД и пополнение ее при каждом новом измерении параметров изоляции, выполняемом при технических обслуживаниях и текущих ремонтах.

#### **Дополнительные параметры изоляции тяговых двигателей локомотивов**

К дополнительным параметрам изоляции, обеспечивающим неразрушающий контроль, измерение которых целесообразно проводить вместе с измерением сопротивления изоляции, будем относить: коэффициент абсорбции ( $K_a$ ), возвратное напряжение ( $U_B$ ), тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ), емкость изоляции ( $C$ ).

**Коэффициент абсорбции.** При приложении к изоляции электрического поля в ней возникают электропроводность, обусловленная токами утечки по примесям, и поляризация, обусловленная процессом заряда объемных емкостей изоляции. Если изоляция подключена к постоянному напряжению, то в ней будут наблюдаться две составляющие тока: постоянный ток утечки ( $I_y$ ), характеризующий степень увлажнения и загрязнения изоляции, и экспоненциально затухающий ток абсорбции ( $I_{аб}$ ).

Отношение максимального тока абсорбции к току утечки  $I_{аб.макс}/I_y < 1$  изоляция является увлаж-

ненной и требует сушки. Для большинства видов изоляции ток абсорбции затухает в течение 60 секунд. Поскольку измерение токов в изоляции затруднительно, степень увлажнения изоляции принято оценивать с помощью коэффициента абсорбции

$$K_a = \frac{i_{(15)}}{i_{(60)}} = \frac{R_{(60)}}{R_{(15)}},$$

где  $i_{(15)}$ ,  $R_{(15)}$  – ток и сопротивление изоляции через 15 секунд после приложения напряжения;

$i_{(60)}$ ,  $R_{(60)}$  – то же через 60 секунд после приложения напряжения.

В процессе эксплуатации изоляция ТЭД подвергается тепловым, электрическим и механическим нагрузкам, происходит ее старение, и коэффициент абсорбции постепенно снижается.

Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей [4] регламентировано измерение коэффициента абсорбции обмоток статора для электрических машин переменного тока общепромышленного применения и установлены значения коэффициента абсорбции:  $K_a > 1,2$  для двигателей с микалентной компаундированной изоляцией;  $K_a > 1,3$  для двигателей с терморезистивной изоляцией. Нормы испытаний электрооборудования ПАО «Россети» предусматривают измерение коэффициента абсорбции для высоковольтных электрических машин переменного тока мощностью более 1 МВт и электрических машин постоянного тока; его величина установлена  $K_a > 1,2 \dots 1,3$  [5]. Условия эксплуатации электрических машин стационарного размещения являются более щадящими по сравнению с тяговыми электрическими машинами. По этой причине величина коэффициента абсорбции для ТЭД локомотивов должна быть определена по результатам специального исследования. Для ТЭД как постоянного, так и переменного тока, измерение коэффициента абсорбции не регламентировано и его значения не нормированы, хотя исследования о возможности оценки состояния изоляции ТЭД по величине коэффициента абсорбции проводились в Нижегородском филиале РГОТУПС [6].

**Возвратное напряжение.** Измерение возвратного напряжения так-

же относится к неразрушающим методам контроля изоляции. Изоляция обмоток якоря ТЭД представляет собой многослойную структуру, в которой при приложении испытательного напряжения происходит заряд емкостей слоев. После отключения изоляции от источника напряжения и кратковременного замыкания накоротко заряд, накопленный в геометрической емкости изоляции, спадает до нуля, а заряд, скопленный на границе слоев (заряд абсорбции) практически не меняется. Заряд абсорбции распределяется между слоями изоляции и определяет наличие возвратного напряжения, которое складывается из экспонент, скорость затухания которых определяется сопротивлением и емкостью каждого слоя изоляции. В процессе эксплуатации происходит старение изоляции, ее электрическая прочность и возвратное напряжение уменьшаются. Измеряя возвратное напряжение изоляции в процессе эксплуатации в одинаковые моменты времени после начала снижения заряда абсорбции, можно судить о степени старения изоляции ТЭД.

Исследования о возможности оценки состояния изоляции трансформаторов по величине возвратного напряжения проводились применительно к высоковольтным трансформаторам общего назначения [7, 8], однако Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей измерение возвратного напряжения трансформаторов и электрических машин не регламентировано [4]. Нормативными документами ОАО «РЖД» измерение возвратного напряжения ТЭД локомотивов также не предусмотрено [2, 3], хотя исследования о возможности оценки состояния изоляции ТЭД по величине возвратного напряжения проводились применительно к ТЭД серии НБ-406 электровозов [6].

**Тангенс угла диэлектрических потерь.** Этот параметр изоляции представляет собой отношение активной проводимости изоляции к ее емкостной проводимости. Его величина определяется диэлектрической проницаемостью и электропроводностью изоляции, не зависит от размеров изоляции и косвенно характеризует ее состояние, поскольку

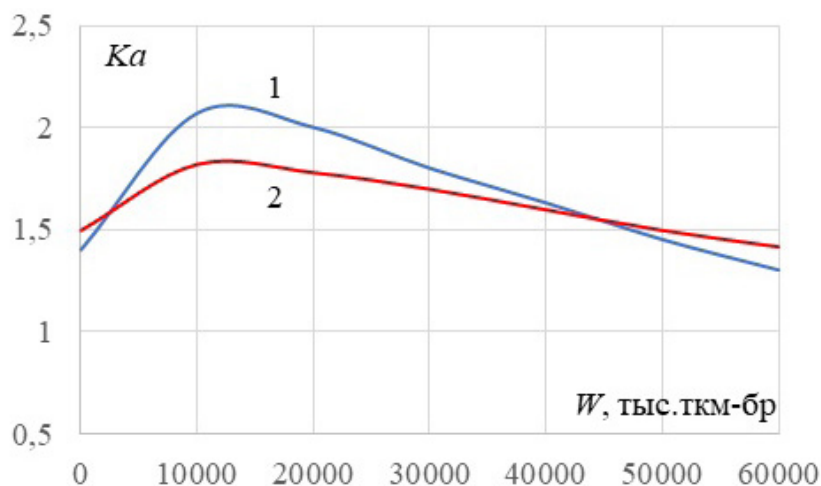


Рис. 1. Зависимость коэффициента абсорбции изоляции ТЭД серии ЭД-118 от эксплуатационной работы локомотива: 1 – штатная изоляция класса F; 2 – модернизированная изоляция класса H

снизить перегревы по отношению к нормативному значению для нового класса изоляции при тех же токовых нагрузках и сократить количество отказов по изоляции ТЭД локомотивов на линии. Комплектом ТЭД с системой модернизированной изоляции класса H был оборудован тепловоз 2ТЭ116-1431. Одновременно комплектом ТЭД со штатной системой изоляции класса F был оборудован тепловоз 2ТЭ116-1430. Оба тепловоза были направлены в опытную эксплуатацию в депо Дно Октябрьской ж.д. В течение периода подконтрольной эксплуатации (32 месяца) осуществлялся регулярный мониторинг дополнительных параметров изоляции ТЭД обоих тепловозов с тем, чтобы установить характер изменения дополнительных параметров в условиях реальных эксплуатационных нагрузок. Кроме этого, для обеспечения возможности контроля текущего состояния изоляции и прогнозирования ее остаточного ресурса должны быть установлены пороговые (предельно допустимые) значения дополнительных параметров, а также сформулированы критерии отбраковки, по которым ТЭД должен быть демонтирован и направлен в ремонт.

На Рис. 1 – 4 представлены результаты мониторинга дополнительных параметров изоляции в виде усредненных по каждому комплекту двигателей зависимостей от эксплуатационной работы локомотива. Из представленных зависимостей видно, что, исключая период начальной приработки, зависимости дополнительных параметров изоляции от эксплуатационной работы локомотива могут аппроксимированы линейными функциями. При этом аппроксимационные коэффициенты в общем случае будут зависеть от характеристик изоляционных материалов, используемых при производстве и ремонте ТЭД со сменой изоляции.

В таблице 1 приведены пороговые значения дополнительных па-

распределенные дефекты (увлажнение, ионизация газовых включений) приводят к увеличению диэлектрических потерь. Рост диэлектрических потерь не только свидетельствуют о развитии дефектов изоляции, но и может приводить к ее нагреву и ускорению процесса теплового старения. Периодические измерения тангенса угла диэлектрических потерь в эксплуатации позволяют судить о старении изоляции и ухудшении ее свойств.

Контроль тангенса угла диэлектрических потерь регламентирован нормативными документами для изоляции высоковольтных трансформаторов [4, 5]. Для изоляции ТЭД локомотивов измерение данного параметра не регламентировано.

**Емкость изоляции.** Измерение емкости изоляции также позволяет проводить неразрушающий контроль качества изоляции: степени ее увлажнения, загрязнения и местного разрушения. Метод контроля емкости изоляции на разных частотах переменного тока основан на том, что диполи, которыми представляются, например, частицы влаги, содержащиеся в изоляционном материале, на малых частотах успевают ориентироваться вдоль линий электрического поля, что увеличивает емкость изоляции. При высоких частотах

изменения приложенного электрического поля диполи влаги не успевают переориентироваться по линиям поля, что приводит к снижению емкости изоляции. Таким образом, для неувлажненной изоляции отношение емкостей на разных частотах будет близко к единице; чем больше влажность изоляции, тем больше будет отношение емкости на малой частоте к емкости на высокой частоте.

Контроль емкости изоляции ТЭД локомотивов действующими нормативными документами ОАО «РЖД» не регламентирован.

#### Изменение дополнительных параметров изоляции ТЭД локомотивов в процессе эксплуатации

В рамках научно-исследовательских работ по совершенствованию изоляции ТЭД локомотивов, находящихся в эксплуатации, а также развитию системы контроля текущего состояния изоляции и прогнозирования ее остаточного ресурса, в АО «ВНИКТИ» разработана новая изоляционная конструкция ТЭД серии ЭД-118 с повышенным классом нагревостойкости (класс H). Модернизированной системой изоляции класса H могут оснащаться ТЭД локомотивов при ремонте со сменой изоляции, что позволит

Таблица 1.

Пороговые значения дополнительных параметров изоляции ТЭД (класса H) серии ЭД-118

Наименование параметра	Коэффициент абсорбции	Возвратное напряжение, В	Тангенс угла диэлектрических потерь (1000 Гц), мЕд	Емкость изоляции (1000 Гц), нФ
Пороговое значение	0,8	4,0	28,5	52,8

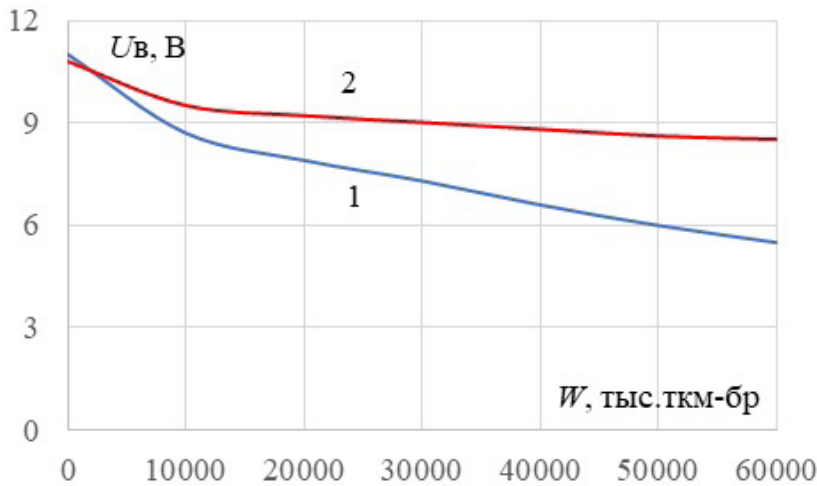


Рис. 2. Зависимость возвратного напряжения изоляции ТЭД серии ЭД-118 от эксплуатационной работы локомотива: 1 – штатная изоляция класса F; 2 – модернизированная изоляция класса H

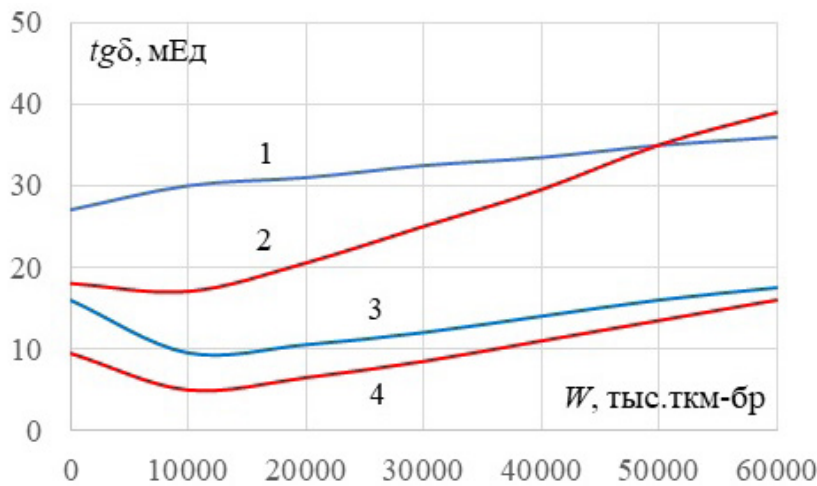


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь изоляции ТЭД серии ЭД-118 от эксплуатационной работы локомотива: 1 – штатная изоляция класса F при частоте 55 Гц; 2 – модернизированная изоляция класса H при частоте 55 Гц; 3 – штатная изоляция класса F при частоте 1000 Гц; 4 – модернизированная изоляция класса H при частоте 1000 Гц

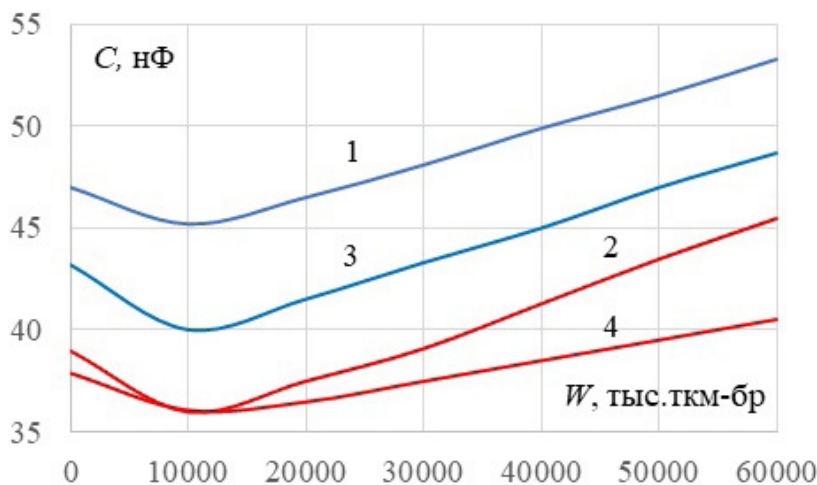


Рис. 4. Зависимость емкости изоляции ТЭД серии ЭД-118 от эксплуатационной работы локомотива: 1 – штатная изоляция класса F при частоте 55 Гц; 2 – модернизированная изоляция класса H при частоте 55 Гц; 3 – штатная изоляция класса F при частоте 1000 Гц; 4 – модернизированная изоляция класса H при частоте 1000 Гц

раметров изоляции класса H для ТЭД серии ЭД-118.

По результатам эксплуатационных испытаний могут быть сформулированы следующие критерии отбраковки ТЭД по текущему состоянию изоляции, которое оценивается с помощью дополнительных параметров:

1. Возвратное напряжение ниже порогового значения.
2. Возвратное напряжение равно или приближено к пороговому значению, а величина емкости изоляции на частоте 55 Гц или тангенса угла диэлектрических потерь на той же частоте приближена к пороговому значению или выше него.
3. Коэффициент абсорбции ниже порогового значения и тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 55 Гц выше порогового значения при соблюдении критерия сухости изоляции  $C_{(55)}/C_{(1000)} \approx 1$ .
4. Коэффициент абсорбции ниже порогового значения и возвратное напряжение приближено или равно пороговому значению при соблюдении критерия сухости изоляции  $C_{(55)}/C_{(1000)} \approx 1$ .

### Заключение

В процессе эксплуатации изоляция ТЭД локомотивов подвергается электрическим, механическим и тепловым нагрузкам, а также воздействию климатических факторов. Это приводит к возникновению распределенных и локальных дефектов, которые могут вызывать пробой изоляции. В настоящее время текущий контроль состояния изоляции ТЭД осуществляется путем измерения ее сопротивления. Это позволяет выявлять грубые дефекты изоляции, но дает мало информации о ее скрытых дефектах и ресурсной составляющей. Применение дополнительных параметров изоляции позволяет оценивать не только текущее состояние изоляции, но и прогнозировать ее остаточный ресурс в процессе эксплуатации.

По результатам испытаний опытных комплектов ТЭД серии ЭД-118 на тепловозах в условиях штатной эксплуатации установлены зависимости дополнительных параметров изоляции ТЭД этого типа от тонно-километровой работы локомотива, а также

сформулированы критерии отбраковки ТЭД в эксплуатации по состоянию изоляции. Исключая период начальной приработки, указанные зависимости могут быть аппроксимированы линейными функциями, что делает их практическое использование доступным. В совокупности с наполнением базы данных это дает возможность прогнозировать остаточный ресурс изоляции каждого ТЭД в условиях депо и позволяет перейти от планово-предупредительной системы ремонтов ТЭД к ремонту по состоянию.

### **Литература**

1. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. – 119 С.
2. Правила ремонта электрических машин тепловозов ЦТ-ЦТВР-4677.
3. Руководство по среднему и капитальному ремонту электрических машин тепловозов РК 103.11.321-2004-ЛУ. Москва, 2004.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Утверждены приказом Минэнерго России от 13 января 2003 года № 6. <http://elec.ru>
5. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Стандарт организации СТО 34.01-23.1-001-2017. – ПАО «Россети», 2017. – 262 с.
6. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы. М.: Маршрут, 2005. – 280 С.
7. Серебряков А.С., Семенов Д.А. Тестовая диагностика корпусной изоляции распределительных трансформаторов АПК // Труды Нижегородского государственного тех-

нического университета им. Р.Е. Алексеева. – № 4 (91), 2011. – С. 191-197.

8. Волков А.С., Груздев В.В., Крюков О.В. Методика определения остаточного ресурса изоляции по возвратному напряжению для распределительных трансформаторов подстанций // Автоматизация и ИТ в энергетике. – № 4 (141), 2021 – С. 2-8.

### **Проход Денис Иванович**

В 2004 году окончил Российский государственный открытый технический университет путей сообщения (РГОТУПС) по специальности «Электрический транспорт». С 2005 года работает в АО «ВНИКТИ», с 2014 года – начальник отдела АО «ВНИКТИ». Имеет 11 научных трудов.

### **Prokhor Denis Ivanovich**

In 2004 he graduated from the Russian State Open Technical University of Railways (RGOTUPS) majoring in Electric Transport. Since 2005 he has been working at AO VNIKTI, since 2014 he is the Head of Department of the AO VNIKTI. He has 11 scientific papers.

### **Никитин Виктор Валерьевич**

Доктор технических наук, доцент. В 1988 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация транспорта». В 2004 году защитил докторскую диссертацию по проблеме электромагнитной совместимости и взаимодействия сверхпроводниковых магнитных систем с электрооборудованием традиционного исполнения. Профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского университета путей сообщения

Императора Александра I (ПГУПС). Имеет около 100 научных трудов.

### **Nikitin Viktor Valerievich**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. In 1988 he graduated from the Leningrad Institute of Railway Transport Engineers majoring in Transport Electrification. In 2004 he defended his doctor's dissertation on the problem of electromagnetic compatibility and interaction of superconducting magnetic systems with traditional electrical equipment. Professor of the Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department of the St. Petersburg State Transport University. He has about 100 scientific papers.

### **Евстафьев Андрей Михайлович**

Доктор технических наук, профессор. Окончил ПГУПС в 2001 году по специальности «Электрический транспорт». Заведующий кафедрой «Электрическая тяга» ПГУПС. В 2018 году защитил докторскую диссертацию по проблеме повышения энергетической эффективности электрического подвижного состава. Имеет свыше 150 научных трудов.

### **Evstafiev Andrey Mikhailovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor. He graduated from St. Petersburg State Transport University in 2001 majoring in Electric Transport. Head of the Electric Traction Department of the St. Petersburg State Transport University. In 2018, he defended his doctoral dissertation on the problem of improving the energy efficiency of electric rolling stock. He has more than 150 scientific papers.

## Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования

// MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF POWER TRANSFORMERS BY THE METHOD OF ACOUSTIC DIAGNOSTICS //

**Еркебаев А.,  
Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск**

Актуальность заявленной тематики научного исследования обуславливается необходимостью разработки и последовательного внедрения эффективных методик текущего технического состояния силовых трансформаторных подстанций в системе железных дорог Республики Казахстан с использованием методов акустического диагностирования. Целью данной научно-исследовательской работы является изучение перспектив улучшения контроля технического состояния силовых трансформаторов, применяющихся в железнодорожном хозяйстве Казахстана при условии использования метода акустического диагностирования для решения всех проблемных вопросов осуществления подобного контроля. Основу методологического подхода в данной научно-исследовательской работе составляет сочетание методов системного анализа существующих на сегодняшний день подходов к осуществлению контроля текущего технического состояния силовых трансформаторов с использованием методов акустического диагностирования с аналитическим исследованием принципиальных возможностей осуществления данных операций в системе железных дорог Республики Казахстан. Результаты, полученные в ходе данной научно-исследовательской работы, свидетельствуют о наличии разнообразных вариантов применения методов акустического диагностирования для осуществления

контроля технического состояния силовых трансформаторных подстанций, а также подтверждают необходимость последующего усовершенствования применяющихся методик контроля для достижения высокого качества функционирования силовых трансформаторных подстанций железных дорог. Результаты данной научно-исследовательской работы, а также сформулированные на их основании выводы имеют существенное прикладное и практическое значение для сотрудников различных подразделений и служб железнодорожной отрасли Республики Казахстан, по роду деятельности сталкивающихся с необходимостью практической реализации широкого комплекса мероприятий по контролю технического состояния силовых трансформаторных подстанций, обеспечивающих бесперебойное функционирование подвижного состава железной дороги, а также для разработчиков методов технического контроля состояния силовых трансформаторов, в чьи функции входит повышение эффективности применяющихся методов контроля.

**Ключевые слова:** силовые трансформаторные подстанции, тяга поездов, подвижной состав железной дороги, акустическое диагностирование, железнодорожная отрасль Республики Казахстан, контроль технического состояния силовых трансформаторов.

The relevance of the stated topic of scientific research is due to the need to develop and consistently implement effective methods of the current state of power transformer substations in the railway system of Kazakhstan,

using methods of acoustic diagnostics. The purpose of this research work is to study the prospective improvement of the control of the technical condition of power transformers used in the railway economy of Kazakhstan, provided that the method of acoustic diagnostics is used to solve all the problematic issues of such control. The basis of the methodological approach in this research work is the methods of combining the methods of system analysis today, approaches to the use of methods for monitoring the technical condition of power transformers using methods of acoustic diagnostics of the Republic of Kazakhstan, with an analytical study of the main possibilities of carrying out operations in the railway system of Kazakhstan. The results obtained in this research work indicate the presence of various options for the application of acoustic diagnostics methods for monitoring the technical condition of power transformer substations, and also confirm the need for further improvement of control methods to achieve high quality of operation of power transformer substations of railways. The results of this research work, as well as practical conclusions based on them, have significant applied and practical importance for employees of various departments and services of the railway industry of the Republic of Kazakhstan. Ensuring the uninterrupted operation of the rolling stock of the railway, as well as for developers of methods for technical control of the state of power transformers.

**Keywords:** power transformer substations, train traction, railway rolling stock, acoustic diagnostics, railway industry of the Republic of Kazakhstan, control of the technical condition of power lines of transformers.

### Введение

К числу наиболее распространенных и эффективных в практическом использовании методов контроля технического состояния силовых трансформаторов является метод акустического диагностирования, предполагающий локацию и точечное определение уровня распределяемых звуковых разрядов. Таковыми называются разряды, шунтирующие только определенный участок изоляционного покрытия силового трансформатора. Они свидетельствуют о наличии локальных дефектов, требующих своевременного устранения. Это могут быть ослабления изоляционного покрытия по причине образования газовых полостей, а также возникновения острых кромок металлических конструкций [1]. Включения газа являются ослабленными участками вне зависимости от консистенции изоляционного покрытия (твердое или жидкое), ослабление которых имеет место по причине несоответствия показателей диэлектрической проницаемости газа, а также высоких показателей напряженности электрического поля, имеющих место во включениях и в несколько раз превышающих аналогичные значения в других точках изоляционного покрытия. Также следует принимать во внимание тот факт, что показатель электрической плотности газа существенно меньше, чем аналогичный показатель твердых и жидких диэлектриков. Возникновение описываемых частичных разрядов возможно также в непосредственной близости от острых краев электродов, в областях, где существенно возрастают напряженности электрического поля [2]

Необходимость осуществления своевременного контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования во многом обуславливается частыми повреждениями изоляционного покрытия силовых трансформаторов, происходящих по причине частых разрядов в масляных прослойках, пребывающих в непосредственном контакте с твердой изоляцией. В подобных ситуациях на поверхности твердого изоляционного покрытия появляются устойчивые проводя-

щие следы. На подобных участках из-за возникновения избыточных перенапряжений и рабочих напряжений возможно возникновение разрядов поверхностного типа, развитие которых происходит непрерывно и завершается пробоем изоляционного покрытия [3]. Это свидетельствует о значительной опасности, которую несут в себе частичные разряды для изоляции силовых трансформаторов из-за высокой вероятности разрушения изоляционного покрытия на отдельных участках и развития пробоев промежутков изоляции.

Технический персонал, в чьи непосредственные служебные обязанности входит обслуживание силовых трансформаторных подстанций, вынужден сталкиваться с проблемами возникновения пробоев изоляционного покрытия, а также появления частичных разрядов в изоляционном слое при высоких и сверхвысоких значениях напряжения на линиях подстанций. Этим объясняется необходимость своевременного и качественного осуществления контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования с целью предупреждения пробоев изоляции и обеспечения бесперебойного функционирования силовых трансформаторных подстанций [4].

Сложившаяся ситуация обуславливает необходимость проведения исследований, основными задачами которых являются:

- оценка технического состояния современных силовых трансформаторных подстанций, которые используются в системе железнодорожного транспорта Республики Казахстан, с акцентом на определение текущих проблем технического состояния масляного оборудования, выполненного при проведении мониторинга частичных разрядов;
- разработка и внедрение методик акустических измерений, предназначенных для диагностики и анализа частичных разрядов на изоляционном покрытии трансформаторных подстанций, а также определения конкретного месторасположения дефектов трансформаторной изоляции;
- проведение научных экспериментов, направленных на изучение су-

ществующих методик диагностики оборудования силовых трансформаторных подстанций.

Проблемой существующих научных исследований вопросов осуществления контроля текущего технического состояния трансформаторных подстанций является отсутствие подробных и достоверных, проверенных практическим путем научных разработок использования методик акустического диагностирования технического состояния силовых трансформаторов [5]. Данное научное исследование предполагает восполнение этого пробела в научных разработках и качественное раскрытие тематики использования методик акустического диагностирования для решения проблемных вопросов, связанных с контролем технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций. В ходе исследования использовалась информация, полученная экспериментальным путем при проведении конкретных научных экспериментов в рамках изучения заявленной тематики данного исследования.

### Материалы и методы

Основу методологии данной научно-исследовательской работы составляет сочетание методов системного анализа существующих на сегодняшний день подходов к осуществлению контроля текущего технического состояния силовых трансформаторов с использованием методов акустического диагностирования с аналитическим исследованием принципиальных возможностей осуществления данных операций в системе железных дорог Республики Казахстан. Соединение в методологии научного исследования теоретических и практических методик изучения вопросов контроля технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций методом акустического зондирования способствует наиболее объективному и качественному раскрытию тематики научного исследования, а также формированию полноценных выводов, отражающих основные результаты, полученные в ходе данного научного исследования.

Теоретической базой данной работы выступают доступные публи-



кации отечественных и зарубежных исследователей, посвященные разнообразным теоретическим аспектам создания принципов и методик контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования. В целях создания максимально объективной и качественной картины научного исследования, а также в целях облегчения восприятия подаваемой информации все материалы, взятые из зарубежных исследований и представленные в данной научной работе, были переведены на русский язык.

В данном научном исследовании была установлена следующая очередность этапов выполняемых работ.

На первом этапе было принято решение разбирать доступных научных публикаций, посвященных исследованиям проблем понятия акустического диагностирования, а также контроля технического состояния силовых трансформаторов с использованием данных методик. Были сформулированы основные аспекты, обуславливающие необходимость проведения научных исследований, и определены приоритетные направления их проведения с целью разрешения вопросов, вынесенных в его тематику. Теоретическое исследование предваряет системный анализ существующих на сегодняшний день подходов к осуществлению контроля текущего технического состояния силовых трансформаторов с использованием технологии акустического диагностирования, который также был последовательно выполнен на данном этапе научной исследовательской работы.

На следующем этапе научной работы было произведено аналитическое исследование особенностей осуществления контроля технического состояния силовых подстанций методом акустического диагностирования в системе железных дорог Республики Казахстан. Кроме того, на данном этапе научно-исследовательской работы было проведено аналитическое сравнение полученных предварительных результатов с итоговыми результатами исследований других ученых, также занимавшихся изучением возможностей проведения контроля технического состояния оборудования трансформаторных подстанций

посредством практического применения метода акустического диагностирования. Таким образом, обеспечивается максимально объективное восприятие полученных результатов в контексте их последующего практического применения для решения конкретных задач, возникающих в процессе эксплуатации трансформаторных подстанций в сфере железнодорожного хозяйства отдельно взятого государства.

На заключительном этапе научного исследования на основании полученных в ходе него результатов были сформулированы окончательные выводы, выступающие итогами научного исследования и логическим отражением полученных результатов. В целом результаты данной научно-исследовательской работы и сформулированные на их основе выводы представляют собой качественную основу для проведения последующих научных изысканий в направлении изучения возможностей осуществления контроля технического состояния силовых трансформаторов, применяющихся в железнодорожной отрасли, методом акустического диагностирования.

**Результаты и обсуждение**

В ходе выполнения задач, поставленных в тематике данной работы, были проведены опытно-экспериментальные исследования, предполагающие размещение датчиков акустического типа на нескольких трансформаторах, взятых для проведения научно-исследовательских работ. В данном случае использовались датчики акустических разрядов «AC-Sensor», предназначенные для контактной регистрации импульсов частичных разрядов на поверхности изоляции и силового оборудования трансформаторных подстанций подвижного состава.

Методика проведения исследований предполагает соблюдение следующей последовательности

выполнения научно-исследовательских работ:

1. К прибору, фиксирующему уровень частичных разрядов на поверхности изоляционного слоя силового трансформатора, присоединяется акустический датчик «AC-Sensor». Он позволяет фиксировать возникновение в системе частичных разрядов, а также характерных акустических импульсов. Если удастся обнаружить область частичных разрядов, несколько акустических датчиков указанного типа располагаются последовательно на строго определенном расстоянии друг от друга. Полученные акустические сигналы регистрируются, и на основании полученных данных выстраивается четкая последовательность.
2. Экспериментально определяется максимально допустимое пороговое значение акустического сигнала, которое может быть применено для последующих исследований.
3. Выстраиваются пороговые значения настроек непосредственно в областях обнаружения частичных разрядов, а также параметры помех, возникающих в случае превышения уровня сигнала заданного порогового значения. Все указанные величины определяются типом трансформаторов и рассчитываются непосредственно в ходе проведения эксперимента, исходя из конкретных исходных данных.

Все измерения были выполнены в течение предварительно обозначенного промежутка времени.

В ходе данного научного исследования было проведено распределение обнаруженных повреждений изоляционного слоя силовых трансформаторов непосредственно по типам напряжений, характерных для трансформаторов определенного класса. Данные, полученные в ходе указанного распределения, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Данные распределения обнаруженных в ходе эксперимента повреждений изоляционного слоя силовых трансформаторов по классам напряжений

Класс напряжений	110 кВ	150 кВ	220 кВ	330 кВ	500 кВ	750 кВ	1100 кВ
Повреждения	42	28	34	15	6	1	5

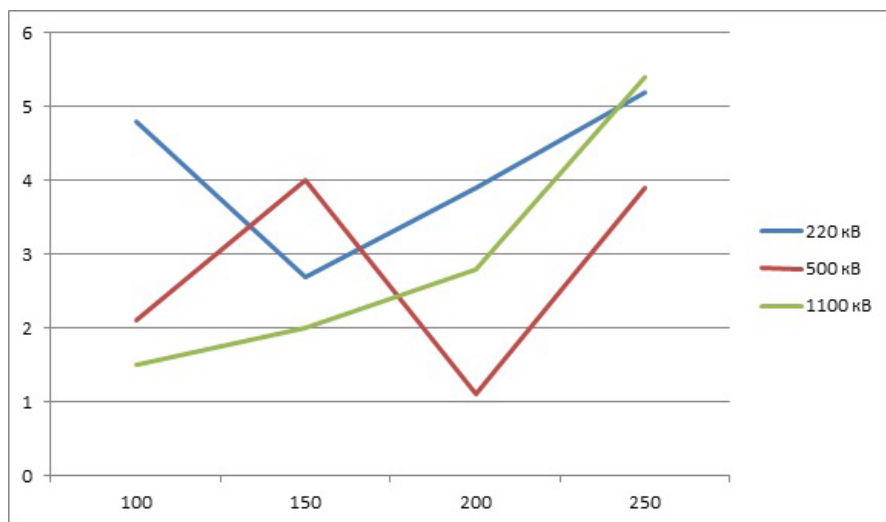


Рис. 1. Зависимость импульсов частичных разрядов от акустических импульсов, возникающих при размещении датчиков на поверхности изоляционного слоя

По результатам, полученным в ходе проведения исследований с использованием акустических датчиков «АС-Sensor», построена графическая зависимость импульсов частичных разрядов от акустических импульсов, возникающих при размещении датчиков на поверхности изоляционного слоя. Данные представлены для трех трансформаторов с различными классами напряжений: 220 кВ, 500 кВ и 1100 кВ. Графическая зависимость указанного рода представлена на рис. 1.

Как видно из данных, представленных на рис. 1, равномерное нарастание зависимости рассматриваемых показателей имеет место в случае практического применения силовых трансформаторов с классом напряжений не ниже 1100 кВ. При использовании силовых трансформаторов с параметрами классов напряжений других типов практически отсутствует планомерное развитие зависимости импульсов частичных разрядов от акустических импульсов, возникающих при размещении датчиков на поверхности изоляционного слоя, что может в ряде случаев свидетельствовать о высокой вероятности возникновения пробоев изоляционного слоя силового трансформатора и создания аварийной ситуации [6]. Кроме того, налицо значительные перепады зависимости исследуемых параметров в ряде случаев, что может свидетельствовать о нарушениях эксплуатационного использования силовых трансформаторов и проблемах с качеством материала

изоляционного слоя, что крайне негативно сказывается на общем состоянии силовых трансформаторных подстанций в контексте перспектив их практического использования в будущем в системе железнодорожного транспорта Казахстана.

Методы обнаружения частичных разрядов и их измерения являются основополагающими с точки зрения изучения перспектив контроля технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций. На представленном ниже рис. 2. отображены основные методы контроля частичных разрядов и их обнаружения в контексте перспектив их использования для проведения контроля технического состояния силовых железнодорожных подстанций. Акустические методы контроля, представленные на данной схеме, являются основными в контексте данного научного исследования и представляют собой наибольшую перспективу с точки зрения возможностей осуществления качественного контроля технического состояния силовых трансформаторов без прерывания их работы и отключения для выполнения необходимых исследований.

Акустические методы обнаружения частичных разрядов предполагают поиск и последовательное обнаружение, а также измерение величин колебаний, вызванных частичными разрядами. Высокая частота подобных звуковых колебаний может быть определена исключительно с использованием специальной регистрирующей аппаратуры. Кроме того, определяются время и место возникновения подобного разряда, а также его мощность. В последующем применение специальной аппаратуры для регистрации перепадов амплитуды звуковых колебаний может иметь существенное значение для получения результатов высокой точности, отражающих реальные возможности применения акустических методов обнаружения частичных разрядов.

При практическом использовании каждого метода предполагается применение датчиков разного рода, которые используют в своей основе принципы преобразования акустических и электромагнитных колебаний в некотором диапазоне частот: сверхвысокочастотные, высокочастотные, среднечастотные и низкочастотные. Диапазон указанных датчиков может существенно различаться в зависимости от типа трансформаторного оборудования и особенностей его изоляционного слоя. Также при выборе метода и типа измерения необходимо принимать во внимание решаемые задачи и параметры электроэнергетической трансформаторной установки объекта железнодорожного транспорта. Для определения параметров частотных разрядов на небольших расстояниях высокую эффективность демонстрируют датчики сверхвысоких частот, они весьма компактны и могут быть легко размещены во внутреннем пространстве энергетических установок, таких, как статор электрического двигателя.

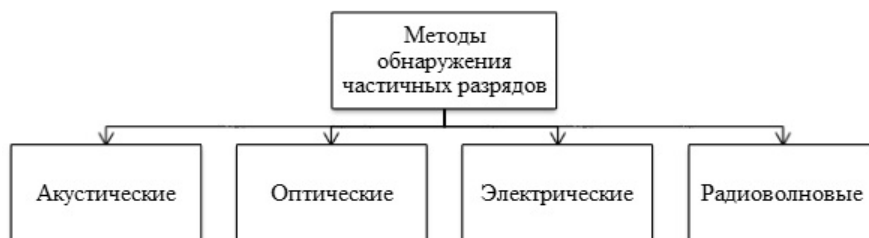


Рис. 2. Методы контроля частичных разрядов и их обнаружения

Особое внимание при регистрации частичных разрядов в изоляционном покрытии силовых трансформаторов следует уделить разрядам данного рода, возникающих в масляных прослойках, которые вступают в непосредственный контакт с изоляцией твердого типа. В подобных случаях, как правило, повреждения твердого изоляционного слоя избежать не удастся, что предполагает необходимость проведения в последующем ремонтных работ для восстановления нарушенного изоляционного покрытия. Это обуславливает существенную опасность, которую представляют частичные разряды для электроэнергетического оборудования в контексте его быстрого разрушения в определенных участках и возникновения пробоев изоляционного слоя.

Во избежание возникновения подобной ситуации необходимо осуществление комплекса мероприятий, в общем виде имеющих следующую направленность:

- выполнение мониторинга частичных разрядов с целью формирования качественной оценки технического состояния масляных прослоек оборудования силовых трансформаторных подстанций, а также оценки возможностей нарушения твердого слоя изоляции за счет воздействия частичных разрядов на масляные прослойки;
- внедрение в промышленных объемах оборудования для диагностики и анализа величины частичных разрядов и образования дефектных участков в изоляционном покрытии силовых трансформаторов;
- проведение научных экспериментов в области диагностирования текущего технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций и обеспечения их последующего бесперебойного функционирования с учетом возможностей разрушения изоляционного слоя.

Перспективы развития системы железных дорог Республики Казахстан во многом выстраиваются на качественной работе электроэнергетического оборудования. В данном контексте вопросы контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования играют

важнейшую роль, поскольку позволяют поддерживать на должном уровне функционирование всего оборудования трансформаторных подстанций в течение продолжительного времени без проведения капитального ремонта и с обеспечением качественной профилактики текущего состояния оборудования трансформаторных подстанций и своевременным выявлением всех возможных дефектов эксплуатационного использования.

В последние несколько десятилетий в энергетических цехах отдельных предприятий железнодорожной отрасли и в целом в энергетическом секторе экономики Казахстана постепенно стали проявляться тенденции к последовательному переходу от практики проведения ремонтов планового характера, предназначенных для предупреждения возникновения неисправностей электрооборудования железнодорожного транспорта и профилактики возникновения проблем энергетической системы подвижного состава железных дорог, к выявлению и устранению реальных погрешностей технического состояния электрического оборудования, которое в основном практикуется в государствах с развитой экономикой и отлаженным функционированием системы железнодорожного транспорта. Подобное положение вещей предполагает разработку и внедрение комплекса методов по своевременному диагностированию состояния электрического оборудования [7].

Бесперебойную работу силовых трансформаторов следует считать фактором, который во многом определяет безопасность функционирования промышленных предприятий, а также надежность и качество снабжения электрической энергией организаций, принадлежащих к различным экономическим секторам. Качественное функционирование силовых трансформаторов обеспечивает согласование работы трансформаторных подстанций с системой, а также преобразование целого перечня параметров электроэнергии в необходимые для ее последующего практического применения. Существенный уровень износа трансформаторного оборудования создает потенциальную опасность как для

конечных потребителей, так и для персонала, в чьи непосредственные обязанности входит обслуживание оборудования трансформаторных подстанций и контроль их технического состояния [8].

Энергетическая безопасность предприятий железнодорожной отрасли, по роду деятельности использующих силовые трансформаторы, которые во многом определяют качество энергообеспечения и надежность функционирования всей энергосистемы железнодорожного транспорта, требует установления четкой системы контроля технического состояния силовых трансформаторов посредством использования разнообразных методов контроля, одним из которых является метод акустического диагностирования [9]. Использование трансформаторов рискованно само по себе, и высокая степень риска подобного использования представляет собой существенную опасность как для конечных потребителей электрической энергии, так и для обслуживающего персонала трансформаторных подстанций.

Внедрение диагностического оборудования в практику контроля за состоянием трансформаторных подстанций предполагает разработку серии подготовительных мероприятий, направленных на получение информации по текущим основным вопросам:

- выявление общего количества силовых трансформаторов с истекшим сроком эксплуатации, которые способны давать повышенное число отказов при их дальнейшем использовании;
- текущее качество контроля функционирования силовых трансформаторных подстанций, выявленные нарушения принципов их эксплуатации согласно положениям государственных отраслевых стандартов;
- возможность постепенного перехода от практики проведения плановых ремонтов к ремонтам, обусловленным реальными проблемами технического состояния трансформаторной техники [10].

При этом следует принимать во внимание, что практика эксплуатации трансформаторного оборудования после окончания гарантийного

срока его использования является общепринятой во всем мире несмотря на то, что без принятия соответствующих мер по предотвращению и профилактике аварийных ситуаций она сопряжена с немалыми опасностями для оборудования трансформаторных подстанций. Также важным аспектом выступает практическая невозможность замены большого объема трансформаторного оборудования в сжатые сроки, кроме того, она невыгодна с экономической точки зрения.

В современных экономических реалиях разработка и практическое применение методик контроля технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций является одной из основных задач служб технического контроля предприятий, использующих в своей деятельности оборудование данного рода. Внеплановые остановки силовых трансформаторных подстанций, произошедшие по причине аварийного выхода из строя трансформаторного оборудования, приводят к значительным материальным потерям, а в ряде случаев могут обернуться непредсказуемыми последствиями [11]. В данном контексте задачи своевременного контроля состояния силовых трансформаторов, использующихся в железнодорожной отрасли, приобретают особую важность, поскольку неразрывно связаны с качеством функционирования подвижного состава железной дороги в ряде случаев, а также способствуют повышению общего уровня безопасности железнодорожного хозяйства.

На протяжении последних двух десятилетий для диагностики технического состояния силовых трансформаторов использовалась методика регистрации частичных разрядов в высоковольтном оборудовании энергетических систем. Подобная методика показала высокую эффективность при ее использовании в различных отраслях, в том числе и в системе железнодорожного транспорта. Кроме того, хорошие результаты были достигнуты при использовании метода локации зон электромагнитной активности, который применялся исключительно на поверхности трансформатора и предполагал установку на данной поверхности датчиков измерения,

а также прочих измерительных устройств. Подобные меры давали возможность сформировать полноценное заключение относительно технического состояния узла силового трансформатора, в котором были обнаружены дефекты, а также проблемы изоляционного слоя, нарушения функционирования барьеров, дуги магнитопровода, появление искрений и т.п. [12]. Информации данного рода наряду с данными о типах разрядного явления и его места может отождествляться с конструктивными особенностями как самого трансформатора, так и его активной части. Таким образом, показатели надежности функционирования могут быть спрогнозированы с высокой степенью достоверности, поскольку заключение относительно возможности дальнейшего функционирования формируется на основании не просто общих оценок характеристик частичных разрядов, а принимая во внимание точное место их расположения. В данном контексте следует отметить, что появление частичных разрядов в местах крепления магнитопроводов трансформаторов не представляет существенной значимости, поскольку малые величины частичных разрядов в витковой изоляции не смогут принести существенного вреда конструкции.

Постоянный контроль текущего технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций системы железнодорожного транспорта является одной из основных задач современной системы обеспечения энергетической безопасности указанной транспортной системы. В данном контексте контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического зондирования представляется одним из наиболее оптимальных методов обеспечения бесперебойной работы транспортной энергосистемы с учетом особенностей функционирования железнодорожного транспорта в условиях современных экономических реалий. В целом именно качественное и надежное функционирование силовых трансформаторов является необходимым условием для последовательного преобразования серии энергетических параметров в величины, необходимые для даль-

нейшего использования электрической энергии. При этом необходимо в обязательном порядке учитывать степень риска использования оборудования трансформаторных подстанций, поскольку нарушения условий эксплуатации силового трансформаторного оборудования может стать причиной возникновения существенных проблем как для обслуживающего персонала, так и для конечных потребителей электрической энергии [13].

Современное оборудование силовых трансформаторных подстанций, которые применяются в различных узлах и объектах системы железнодорожного транспорта, требует регулярного проведения качественного контроля технического состояния силовых трансформаторных подстанций с использованием самых современных методов диагностики. Параллельное использование различных методов диагностики технического состояния силового трансформаторного оборудования позволяет получить оптимальные результаты при сравнении эффекта от использования нескольких методов диагностики, а также подобрать оптимальный метод контроля, исходя из реалий сложившейся ситуации. Кроме того, диагностика состояния трансформаторного оборудования необходима для своевременного обнаружения дефектов, которые могут иметь пагубные последствия с точки зрения соображений безопасности функционирования оборудования силовых трансформаторных подстанций. В данном контексте при проведении диагностики и после ее завершения следует обращать особое внимание на организацию качественного ремонта и устранения обнаруженных дефектов, что в последующем обеспечит полноценное функционирование силовых трансформаторных подстанций на протяжении длительного времени [14].

Вместе с тем система мониторинга технического состояния силовых трансформаторных подстанций повышает эффективность функционирования силовых трансформаторов объектов железнодорожного транспорта, поскольку частота проверок в сочетании с их качеством и направленностью позволяет выполнить профилактику возникновения

повреждений и прочих дефектов конструкции, что исключает в последующем возникновение и развитие проблемных ситуаций, связанных с нарушениями правил эксплуатации трансформаторного оборудования. В данном контексте следует отметить, что силовые трансформаторы относятся к группе электрического оборудования с самой высокой частотой проявления повреждений [15]. Проведенные в разное время исследования наглядно продемонстрировали, что высоковольтные вводы трансформаторов характеризуются наибольшей повреждаемостью, поскольку на них приходится около 22% всех повреждений, причём обмотки занимают примерно 16%, оборудование РПН – 13,5%. Отмечено, что подобные повреждения с одинаковой частотой возникают у трансформаторов с различными сроками эксплуатации в то время, как применительно к трансформаторам со сроком эксплуатации от 10 до 30 лет справедливо утверждение о том, что именно у них отмечена наибольшая частота вывода из строя оборудования РПН. Также отмечено, что после 10 лет эксплуатации силовых трансформаторных подстанций повышается частота повреждений высоковольтных вводов. При этом следует принимать во внимание тот факт, что наиболее существенной проблемой силовых трансформаторов, приводящей к нарушению их работы порой на продолжительное время, является короткое замыкание [16]. Согласно полученной аналитической информации, повреждение обмоток силовых трансформаторов приводит к коротким замыканиям в 80% среди всех случаев нарушений и общего количества повреждений трансформаторных обмоток, повреждение высоковольтных вводов – до 89% всех случаев, нарушения функционирования РПН – до 25% всех случаев, в то время как повреждения остальных узлов, а также ошибки при монтаже, различных ситуациях, возникающих при эксплуатации оборудования и его ремонте, в совокупности дают до 36% всех случаев коротких замыканий [17].

Проведение качественной диагностики текущего технического состояния силовых трансформаторов, использующихся на различ-

ных железнодорожных объектах, зачастую требует использования специальных приборов, а также дополнительных методов локализации зон электромагнитной активности на поверхности трансформатора. Совокупность применяющихся методик обеспечения высокого качества проверки технического состояния силовых трансформаторов, предполагающих использование методик акустического диагностирования и смежных с ним, обеспечивает широкую вариативность данных контроля, на основании которых может быть составлена полноценная картина текущего состояния системы энергообеспечения различных объектов железнодорожного транспорта и перспектив развития данной отрасли в последующем [18].

Сохранению высокого качества работ по диагностированию состояния электротехнического оборудования и обеспечения высокого уровня выполнения работ по профилактике поломок силовых трансформаторов в процессе эксплуатации способствует проведение специальных экспериментальных исследований, направленных на установление взаимосвязи между техническим состоянием трансформаторных подстанций и качеством функционирования энергетической системы железнодорожного транспорта в целом [19]. Посредством проведения исследований данного рода появляется возможность оценивать качество работы трансформаторных подстанций и формировать комплекс мероприятий, направленных на улучшение функционирования трансформаторных подстанций с учетом необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ при поломках основного оборудования силовых линий. Ремонтно-восстановительные работы в таком случае должны проводиться с учетом особенностей конкретных типов трансформаторов и степени поломок, причем качество ремонта оборудования силовых трансформаторных подстанций тесно связано с эффективностью определения причин возникновения поломок электрооборудования, а также временем определения [20].

Таким образом, вопросы контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акусти-

ческого диагностирования требуют детального изучения и исследования для формирования качественного понимания вопросов обеспечения энергетической безопасности и целостности важнейших узлов и объектов железнодорожного транспорта, в состав которых входит оборудование силовых трансформаторных подстанций. При этом уровень безопасности указанных объектов должен быть соотносим с уровнем проведения мероприятий, направленных на поддержание безопасности энергетической системы в целом.

### Выводы

Исследование ключевых аспектов выполнения контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования привело к следующим выводам. Резонансные акустические датчики частичных разрядов «AC-Sensor» показали высокую эффективность в вопросах обнаружения частичных разрядов на поверхности изоляционного слоя оборудования силовых трансформаторных подстанций. Этот факт обуславливает широкие перспективы использования датчиков данного типа в последующем при проведении экспериментальных исследований и работ по определению основных особенностей технического состояния силовых трансформаторов с использованием методов акустического диагностирования. Данное оборудование продемонстрировало высокие эксплуатационные характеристики непосредственно при использовании этого метода.

В целом акустический метод контроля показал хорошие результаты, поскольку его основные достоинства (оперативность контроля и возможность снятия показаний при условии сохранения непрерывной подачи силового напряжения) в целом позволяют сократить время проведения эксперимента с получением высокоточных результатов, объективно отражающих последовательность выполнения работ. Кроме того, метод акустического диагностирования и использование датчиков частичных разрядов «AC-Sensor» показал высокую эффективность при определении причин возникновения нарушений на поверхности изоляционного слоя

силовых трансформаторов, а также возможность максимально точной локализации участков возникновения подобных повреждений.

Проведение в последующем диагностических обследований силовых трансформаторов, применяющихся в системе железнодорожного транспорта Республики Казахстан с использованием методик акустического диагностирования, предполагающих применение акустических датчиков указанного типа, позволяет существенно расширить представления относительно возможностей использования указанной методики для разрешения вопросов оценки технического состояния современных трансформаторных подстанций, которые используются в качестве составных элементов подвижного состава и тяги поездов в системе железнодорожного транспорта Республики Казахстан. Результаты, полученные в ходе данного научного исследования, в последующем смогут послужить качественной теоретической базой для дальнейших исследований проблем и вопросов контроля технического состояния силовых трансформаторов, выполненных с использованием различных современных методик и способных вывести на качественно новый уровень исследования в сфере обеспечения безопасности эксплуатации электроэнергетического оборудования, применяющегося в системе железнодорожного транспорта на сегодняшний день.

#### Литература

1. Forsthoffer M. Forsthoffer's component condition monitoring. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.
2. Papaelias M., Marquez F.P.G., Karyotakis A. Non-destructive testing and condition monitoring techniques for renewable energy industrial assets. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019.
3. Kaneko A., Zhu X.-H., Lin J. Coastal acoustic tomography. – Oxford: Elsevier, 2020.

4. Meshkinzar A., Al-Jumaily A.M., Harris P.D. Acoustic amplification utilizing stepped-thickness piezoelectric circular cylindrical shells // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 437. – P. 110-118.

5. Meggitt J.W.R., Elliot A.S., Moorhouse A.T., Banwell G., Hopper H., Lamb J. Broadband characterisation of in-duct acoustic sources using an equivalent source approach // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Vol. 442. – P. 800-816.

6. Janssen L.A.L., Arteaga I. L. Data processing and augmentation of acoustic array signals for fault detection with machine learning // Journal of Sound and Vibration. – 2020. – Vol. 483. – Article number 115483.

7. Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Карандаева О. И., Мостовой С.Е., Чертусов А.А., Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – № 26. – С. 26-31.

8. Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Девятов Д.Х., Парсункин Б.Н., Сарлыбаев А.А., Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локации частичных разрядов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2012. – №1. – С. 105-108.

9. Malik H., Fatema N., Iqbal A. Intelligent Data-Analytics for Condition Monitoring. – London: Academic Press, 2021.

10. Blanloeuil P., Francis Rose L.R., Veidt M., Wang C.H. Time reversal invariance for a one-dimensional model of contact acoustic nonlinearity // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – Vol. 394. – P. 515-526.

11. Arroyo C.P., Leonard T., Sanjose M., Moreau S., Duchaine F. Large Eddy Simulation of a scale-model turbofan for fan noise source diagnostic // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Vol. 445. – P. 64-76.

12. Weilenmann M., Noiray N. Experiments on sound reflection and

production by choked nozzle flows subject to acoustic and entropy waves // Journal of Sound and Vibration. – 2021. – Vol. 492. – Article number 115799.

13. D'Andrade B. The power grid. – London: Academic Press, 2017.

14. Neighbors T., Bradley D. Applied underwater acoustics. – Oxford: Elsevier, 2017.

15. Correa J.K.J., Guzman A.L. Mechanical vibrations and condition monitoring. – London: Academic Press, 2020.

16. Varanasi S., Siegmund T., Bolton J.S. Acoustical characteristics of segmented plates with contact interfaces // Journal of Sound and Vibration. – 2020. – Vol. 485. – Article number 115584.

17. Elasha F., Greaves M., Mba D., Fang D. A comparative study of the effectiveness of vibration and acoustic emission in diagnosing a defective bearing in a planetary gearbox // Applied Acoustics. – 2017. – Vol. 115. – P. 181-195.

18. Kuryliak D., Lysenko V. Acoustic plane wave diffraction from a truncated semi-infinite cone in axial irradiation // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – Vol. 409. – P. 81-93.

19. Wang Y., Sun M., Cao Y., Zhu J.U., Application of optical interferometry in focused acoustic field measurement // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 426. – P. 234-243.

20. Yang L., Techniques for corrosion monitoring. – Sawston: Woodhead Publishing, 2020.

#### **Еркабаев Айбек**

Аспирант кафедры электро-снабжения железнодорожного транспорта Омского государственного университета путей сообщения.

#### **Erkabaev Aibek**

Post-Graduate student of the Railway Transport Power Supply Department of the Omsk State Transport University.

## Разработка вероятностно-статистической математической модели и критерия оценки соответствия бортового электрооборудования партии автомобилей по параметрам помехоустойчивости

// DEVELOPMENT OF THE PROBABILISTIC-STATISTICAL MATHEMATICAL MODEL AND THE CRITERION FOR ASSESSING THE COMPLIANCE OF THE ON-BOARD ELECTRICAL EQUIPMENT OF THE BATCH OF THE AUTOMOBILES IN TERMS OF THE INTERFERENCE IMMUNITY PARAMETERS //

**Николаев П.А., д.т.н.,  
АО «АВТОВАЗ»,  
г. Тольятти**

**Козловский В.Н., д.т.н.,  
профессор,  
Самарский государственный  
технический университет,  
г. Самара**

**Подгорний А.С., к.т.н.,  
Самарский государственный  
технический университет,  
г. Самара**

**Брачунова У.В.,  
Самарский государственный  
технический университет,  
г. Самара**

*В статье представлены результаты разработки и реализации вероятностно-статистической математической модели и критерия оценки соответствия бортового электротехнического комплекса партии автомобилей по параметрам электромагнитной совместимости.*

*Ключевые слова: автомобиль, бортовой электротехнический комплекс, электромагнитная совместимость.*

*The article presents the results of the development and implementation of the probabilistic-statistical mathematical model and the criteria for assessing the compliance of the on-board electrical equipment of the batch of the automobiles in terms of the electromagnetic compatibility parameters.*

*Keywords: automobile, on-board electrical equipment, electromagnetic compatibility.*

Тестирование на помехоустойчивость к электромагнитному воздействию выборки автотранспортных средств (АТС) с установленными на них электротехническими системами (ЭТС) и бортовым электротехническим комплексом (БЭК) требует много времени. Из-за этого проведение испытаний в таких объемах невозможно. Поэтому при массовом и серийном производстве требуется разработка системы оценки соответствия, основанная на вероятностно-статистическом подходе, который базируется на статистическом анализе данных по результатам испытаний малых выборок, в которой, как правило, участвуют три или четыре автомобиля.

Факторы, от которых зависит помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса:

- амплитуда электромагнитного воздействия;
- позиционирование тестируемого автомобиля по отношению к полеобразующей системе;
- геометрические размеры щелей и отверстий кузова;
- геометрические параметры внутреннего пространства кузова;
- конструкция жгутов проводов и их отклонение от заданной трассы;
- отклонения в пределах заданного допуска от номинального значения расположений блоков электротехнических систем;
- разброс параметров относительно номинального значения радиоэлементов электротехнических систем.

Именно они определяют вид характеристики помехоустойчивости

независимо друг от друга, а их совокупность влияет на конкретные параметры уровней и частот нарушений работоспособности. Это и объясняет различия помехоустойчивостей даже у АТС одной модели и одинаковой комплектации. Поэтому независимо от того, на какой частоте произошёл сбой, важен уровень воздействия, при котором он появился, потому что нарушения работоспособности у разных АТС в этом случае имеют одну и ту же особенность [4]. Этот вывод важен для дальнейшего построения модели оценки соответствия требованиям помехоустойчивости. Он позволяет не учитывать особенности спектрального распределения, а использовать только наименьшие значения уровней характеристик помехоустойчивости каждой ЭТС (БЭК) АТС.

В процессе изготовления ЭТС (БЭК) и самого АТС в массовом производстве вследствие определенной вариабельности технологических процессов конкретные технические параметры также обладают вариабельностью в определенных границах стабильности. Рассуждая аналогично, случайный характер будут иметь и тестовые параметры. В то же время перечисленные факторы являются независимыми друг от друга. Исходя из этого и основываясь на центральной предельной теореме А.Н. Ляпунова, минимальный уровень помехоустойчивости ЭТС (БЭК) будет подчиняться нормальному закону распределения случайной величины [5]. Тогда вероятностная модель оценки соответствия требованиям помехоустойчивости ЭТС и БЭК для партии автотранспортных средств по результатам контрольного тестирования ограниченной выборки АТС содержит в себе два первых момента Гауссовского закона распределения: математическое ожидание и дисперсию.

По результатам испытаний каждого АТС определяется минимальное значение помехоустойчивости. Для двухмерного случая, где АТС с установленной ЭТС (БЭК) ориентирован передней частью к излучающей антенне, минимум находится из условия

$$E(f) \rightarrow E_{min}, \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электромагнитного поля (В/м).

Если проводятся расширенные испытания с меняющимся дискретным угловым позиционированием по отношению к излучающей антенне, то по результатам теста каждого АТС составляется матрица помехоустойчивости, из которой берется минимальное значение:

$$\begin{pmatrix} E_{f_{min}, \alpha_{min}} & E_{f_{min}, \alpha_{min} + \Delta \alpha k} & \dots & E_{f_{min}, \alpha_{max}} \\ E_{f_{min} + \Delta f m, \alpha_{min}} & E_{f_{min} + \Delta f m, \alpha_{min} + \Delta \alpha k} & \dots & E_{f_{min} + \Delta f m, \alpha_{max}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{f_{max}, \alpha_{min}} & E_{f_{max}, \alpha_{min} + \Delta \alpha k} & \dots & E_{f_{max}, \alpha_{max}} \end{pmatrix} \rightarrow E_{min} \quad (2)$$

Учитывая то, что тестовая выборка очень ограничена, по результатам проведенных испытаний первые два момента уровня помехоустойчивости нельзя точно определить. Здесь находятся соответствующие им эффективные оценки. Эффективная оценка математического ожидания находится из выражения

$$\bar{E}_{min} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{min} \quad (3)$$

где  $E_{i min}$  – минимальный уровень помехоустойчивости  $i^{co}$  каждой исследуемой электротехнической системы АТС;  $n$  – количество тестируемых образцов.

Эффективная оценка дисперсии определяется как

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_{i min} - \bar{E}_{min})^2 \quad (4)$$

Далее задача сводится к тому, чтобы с определенной долей вероятности найти значения обоих моментов. В этом случае необходимо найти их интервальные оценки. Так как закон распределения уровня помехоустойчивости известен и является нормальным, то интервальная оценка математического ожидания находится по распределению Стьюдента. Тогда надежность или вероятность ( $P$ ) того, что математическое ожидание попадет в некоторый интервал, будет равна

$$P\left(\bar{E}_{min} - t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} < m_{E_{min}} < \bar{E}_{min} + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha, \quad (5)$$

где  $t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента. Для заданной  $\alpha$  он находится по известным таблицам.

Формула (5) дает для решения задачи достаточно большой диапазон значений математического ожидания. В этом случае более обоснованно следует подходить с позиции наилучшего варианта. Тогда математическое ожидание будет равно:

$$m_{E_{min}} = \bar{E}_{min} - t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

При нахождении дисперсии адекватно применить распределение  $\chi^2$ , потому что изначально математическое ожидание неизвестно.

Тогда надежность или вероятность ( $P$ ) того, что дисперсия попадет в некоторый интервал, будет равна

$$P\left(\sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}} < \sigma_{E_{min}} < \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}}\right) = 1 - \alpha, \quad (7)$$

где  $\chi_a^2$  – коэффициенты распределения. Для заданной  $\alpha$  они находятся по известным таблицам.

Соответственно, интервальная оценка среднеквадратического отклонения ( $\sigma_{E_{min}}$ ) при такой же вероятности будет равна

$$P\left(\sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}} < \sigma_{E_{min}} < \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}}\right) = 1 - \alpha \quad (8)$$

Отсюда доверительный интервал, в который с заданной надежностью  $1 - \alpha$  попадает  $\sigma_{E_{min}}$  равен

$$\sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}} < \sigma_{E_{min}} < \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}}. \quad (9)$$

При выборе среднеквадратического отклонения более обоснованно следует подходить с позиции наилучшего варианта. Тогда  $\sigma_{E_{min}}$  будет равно наибольшей интервальной границе:

$$\sigma_{E_{min}} = \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}}, \quad (10)$$

где  $\chi_a^2$  находится по известным таблицам для  $k = n - 1$  и  $p = 1 - \alpha/2$ .

Физический смысл формулы (10) означает, что выбирается значение наибольшего рассеяния случайной величины (минимального уровня помехоустойчивости).

Найдя нужные числовые характеристики нормального закона распределения из условия худшего варианта, рассчитывается вероятность соответствия БЭК требованиям ЭМС партии АТС одной модели и одинаковой комплектации

$$P_{ATC} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}}} \int_{E_{min}}^{\infty} e^{-\frac{\left[E - \left(\bar{E}_{min} - t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}}\right)\right]^2}{\left[\frac{2(n-1)S^2}{\chi_a^2}\right]}} dE, \quad (11)$$

где  $E_{np}$  – предельно-допустимый уровень помехоустойчивости для электротехнических систем АТС (напряженность электромагнитного поля предельная).

Эта вероятность сравнивается с предельной вероятностью  $P_{np}$ , характеризующей предельно-допустимым показателем качества. Если  $P_{ATC} \geq P_{np}$ , то партия считается соответствующей предельно-допустимым нормам помехоустойчивости. Соответственно, дальнейшие мероприятия по увеличению защищенности электротехнических систем к электромагнитному воздействию не требуются. При результате  $P_{ATC} < P_{np}$  необходимо проводить доработки с целью повышения помехоустойчивости.

Полученная выше математическая модель и критерий позволя-



ют разработать методику расчета оценки соответствия требованиям помехоустойчивости ЭТС (БЭК) для партий АТС. Действующим в настоящее время критерием прохождения изделия в составе транспортного средства является его работоспособность при воздействии некоторого заданного уровня внешнего электромагнитного излучения в регламентируемом диапазоне частот. Для гражданского автотранспорта такие контрольные параметры для его сертификации составляют 30 В/м в диапазоне от 20 МГц до 2 ГГц. Если тестировать ЭТС, воздействуя на них только заданным уровнем, то в этом случае могут возникнуть трудности в оценке большой партии. Потому что если полученные на испытания в ограниченном количестве образцы соответствуют заданным требованиям, то полученная информация для расчетов будет малоинформативная. Поэтому для выявления уровней помехоустойчивости необходимо проводить тестирование БЭК АТС на повышенных режимах нагружения полем. Исходя из этого, в тест-плане на испытания задается коэффициент  $k$ , который определяет, во сколько раз тестовое внешнее электромагнитное воздействие должно превышать предельно-допустимый уровень поля. Он выбирается из диапазона от  $k=2$  до  $k=4$ .

У подготовленной выборки, состоящей из 3 – 4 АТС одной модели и одинаковых комплектаций экспериментально исследуют характеристики помехоустойчивости и определяют наименьший уровень  $E_{min}$ . В зависимости от того, как проводятся испытания (в одной позиции или с меняющимся угловым позиционированием по отношению к излучающей антенне), определяется  $E_{min}$ .

По полученным данным с помощью формул рассчитывается эффективная оценка математического ожидания  $E_{min}$  и дисперсия  $S^2$ .

Выбирается уровень надежности оценок математического ожидания и дисперсии помехоустойчивости электротехнических систем АТС. Как правило, он соответствует предельно-допустимому показателю качества. Для автомобильной продукции гражданского назначения

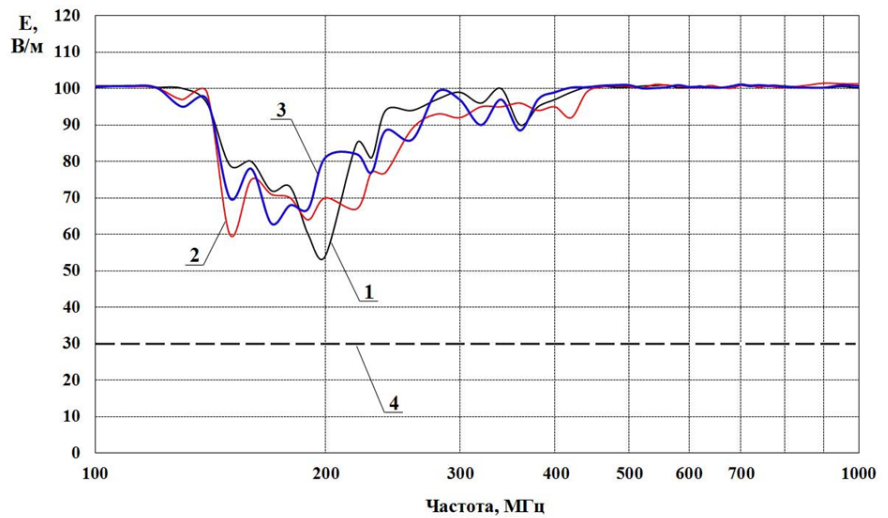


Рис. 1. Характеристики помехоустойчивости автомобилей: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3; 4 – предельно-допустимый уровень помехоустойчивости

наименее допустимая  $P_{np} = 0,8$ , а для АТС специального назначения  $P_{np} = 0,95 \dots 0,98$ .

Далее на основании заданной надежности и с учетом количества испытываемых образцов по таблицам выбираются коэффициенты Стьюдента и  $\chi^2$ , которые для надежности 80% равны:  $t_\alpha = 1,886$ , а  $\chi^2_\alpha = 0,21$ . Затем по формулам вычисляются наиболее ожидаемые значения  $m_{E_{min}}$  и  $\sigma_{E_{min}}$ .

Зная  $m_{E_{min}}$  и  $\sigma_{E_{min}}$ , можно найти вероятность соответствия требованиям БЭК партии АТС одной модели и одинаковой комплектации, которое сравнивается с предельной вероятностью  $P_{np}$ , характеризующей предельно-допустимым показателем качества. На основании результатов данного сравнения принимается решение о целесообразности проведения доработок для повышения помехоустойчивости электротехнических систем в составе АТС.

*Пример расчета.*

1. Количество отобранных для испытаний автомобилей с серийными контроллерами системы управления двигателем: 3 образца.

2. Общие условия эксперимента (позиционирование автомобиля):

- согласно общим требованиям стандарта R10-03, т.е. его ориентация передней частью к излучающей антенне;
- диапазон воздействующих частот: 100 – 1000 МГц;
- шаг перестройки по частоте: логарифмический 2%;
- тип воздействующего сигнала: гармонический немодулированный;

- уровень максимального воздействующего электромагнитного излучения в заданном диапазоне частот: 100 В/м

Характеристики помехоустойчивости, полученные по результатам экспериментов всех трех автомобилей, приведены на рис. 1.

3. Предельно-допустимый уровень помехоустойчивости  $E_{np}$ : 30 В/м.

4. Заданная предельная вероятность  $P_{np}$ : 0,8.

Результаты эксперимента:

- автомобиль №1:  $E_{min} = 54$  В/м (частота 200 МГц);
- автомобиль №2:  $E_{min} = 60$  В/м (частота 150 МГц);
- автомобиль №3:  $E_{min} = 63$  В/м (частота 170 МГц).

Характер нарушения работоспособности: прекращение работы двигателя из-за сбоя контроллера системы управления двигателем.

Результаты расчета:

$$\bar{E}_{min} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 E_{imin} = 59 \text{ В/м}$$

$$S^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (E_{imin} - \bar{E}_{min})^2 = 21$$

$$S = 4,58$$

Табличное значение коэффициента Стьюдента  $t_\alpha$  при надежности оценки  $P = 0,8$  равно 1,886.

$$m_{E_{min}} = \bar{E}_{min} - t_\alpha \frac{S}{\sqrt{2}} = 52,88 \text{ В/м}$$

Табличное значение коэффициента  $\chi^2_\alpha$  при надежности оценки  $P = 0,8$  равно 0,21.

$$\sigma_{E_{min}} = \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}} = 14,14$$

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_a^2}}} \int_{E_{min}}^{\infty} e^{-\frac{[E - (E_{min} + \frac{S}{\sqrt{n}})]^2}{\frac{2(n-1)S^2}{\chi_a^2}}} dE = 0,947$$

$$P \geq P_{np}, \text{ т.к. } 0,947 \geq 0,8.$$

Вывод: автомобили модельного ряда одинаковой комплектации соответствуют требованиям по помехоустойчивости к внешнему электромагнитному воздействию с уровнем 30 В/м в диапазоне частот 100 – 1000 МГц. Проведение мероприятий по увеличению защищенности контроллеров системы управления двигателем к электромагнитному воздействию не требуется.

Сделанный вывод относится к конкретной комплектации АТС и является практическим примером оценки. Положительный результат говорит о достаточности применимых мероприятий по помехозащищенности электротехнических систем. Если при проведении испытаний других комплектаций или моделей результат будет отрицательным, то необходимо повышать помехозащищенность электротехнических систем АТС.

Таким образом, разработана вероятностно-статистическая математическая модель оценки соответствия требованиям помехоустойчивости ЭТС (БЭК) для партий АТС одинаковых моделей и одинаковых комплектаций. Предложена методика расчета оценки соответствия требованиям помехоустойчивости БЭК для партий автотранспортных средств, на основании результатов которой принимается решение о целесообразности проведения доработок для повышения помехоустойчивости БЭК АТС. Выбран предельно-допустимый уровень показателя качества, который для автомобильной продукции гражданского назначения составляет 0,8, а для специального назначения  $R_{np} = 0,95 \dots 0,98$ .

### Литература

1. Козловский, В.Н. Моделирование электрооборудование автомобилей

в процессах проектирования и производства / В.Н. Козловский // монография. Федеральное агентство по образованию, Тольяттинский гос. ун-т. Тольятти, 2009.

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

3. Подгорный А.С. Оценка соответствия автомобилей требованиям помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный // Грузовик. – 2017. – № 10. – С. 44–48.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров // – М.: Наука. – 1988. – 480 с.

5. Пат. № 2642024 Российская Федерация. Способ оценки технических средств на соответствие нормативным требованиям на помехоустойчивость [Текст] / П.А. Николаев, Т.Г. Герасимов, А.С. Подгорный; заявитель и патентообладатель ПАО «АВТОВАЗ». Опубл. 23.01.18, Бюл. № 3.

### Козловский

#### Владимир Николаевич

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 2010 году защитил докторскую диссертацию по теме «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Автор 400 научных работ, из них более 300 в изданиях ВАК, 20 монографий, 40 статей в международных базах Scopus и Web of Science.

### Kozlovskiy Vladimir Nikolaevich

Was born in 1976. In 1999 he graduated from the Togliatti Polytechnic Institute with a degree in Electrical

equipment for cars and tractors. Doctor of technical sciences. In 2010 he defended his doctoral dissertation on the topic «Ensuring the quality and reliability of the electrical system of cars». Work experience is 20 years. At present he works as the head of the Department theoretical and general electrical engineering of Samara State Technical University (SamSTU). He is the author of 400 scientific works, of which more than 300 are in the editions of the Higher attestation commission, 20 monographs, 40 articles in the international Scopus and Web of Science databases.

### Подгорный

#### Александр Сергеевич

Родился в 1992 году. В 2015 году окончил ФГБОУ ВО «ПВГУС» по специальности «Автосервис». Кандидат технических наук. В 2019 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование системы контроля бортового электротехнического комплекса автомобилей на помехоустойчивость к электромагнитным воздействиям». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает научным сотрудником кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета. Автор 17 работ, из них 10 в изданиях ВАК, 2 патента на изобретение.

### Podgorny Aleksandr Sergeevich

Was born in 1992. In 2014 he graduated from PVGUS Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education with a degree in Autoservice. Candidate of Technical Science. In 2019 he defended his thesis on «Improving the control system of the on-board electrical complex of cars for noise immunity to electromagnetic influences». Work experience is 5 years. At present he works as a researcher at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering of the Samara State Technical University. He is the author of 17 works, 10 of which are in the editions of the Higher Attestation Commission, 2 patents for invention.

### Брачунова Ульяна Викторовна

Родилась в 1972 году. В 1994 году окончила СамГТУ по специальности

«Инженер-системотехник (робототехнические системы и комплексы)». Опыт работы – 21 год. В настоящее время является аспирантом кафедры «Теоретическая и общая электротехника» СамГТУ. Имеет 5 научных трудов.

**Brachunova Ulyana Viktorovna**

Was born in 1972. In 1994 she graduated from SamSTU with a degree in «Systems engineer (robotic systems and complexes)». Work experience is 21 years. At present she is a graduate student of the department «Theoretical and general electrical engineering» SamSTU. She has 5 scientific works.

**Николаев**

**Павел Александрович**

Родился в 1977 году. В 2000 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Радиоинженер». Доктор технических наук. В 2012 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение электромагнитной совместимости автомобильных систем зажигания». Опыт работы – 19 лет. В настоящее время работает начальником бюро электромагнитной совместимости ПАО «АВТОВАЗ». Автор более 100 научных трудов, в том числе 23 патентов.

**Nikolaev Pavel Alexandrovich**

Was born in 1977. In 2000 he graduated from Samara State Aerospace University majoring in «Radio engineer». He is doctor of technical sciences. In 2012 he defended the dissertation, the theme is «Provision of electromagnetic compatibility of automobile ignition systems». He has 19 years of work experience. At present he works as the head of the electromagnetic compatibility bureau of PJSC AVTOVAZ. He is author of 100 scientific works, including 23 patents.

## Электромагнитные процессы в бесконтактных двигателях постоянного тока с двумя индукторами

### // ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN NON-CONTACT ENGINES DIRECT CURRENT WITH TWO INDUCTORS //

**Гридин В.М., к.т.н.,  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва**

Электромагнитные процессы исследованы для двух бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ), содержащих трехсекционную якорную обмотку (ЯО), три силовых транзистора и два цилиндрических индуктора с радиальными полюсами. У одного БДПТ ЯО – обычная, барабанная, а числа радиальных полюсов двух индукторов отличаются в три раза. У другого БДПТ ЯО – торoidalная, а числа радиальных полюсов двух индукторов отличаются в два раза. Электромагнитные процессы исследованы для случая, когда распределение результирующей для ЯО магнитной индукции по окружности воздушного зазора наиболее близко к желаемому трапецеидальному. Приведены соответствующие выражения для магнитной индукции как функции от углового положения ротора. Для трех интервалов времени, когда ток в секциях ЯО нарастает, не изменяется и спадает до нуля, получены выражения для ЭДС

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) по сравнению с обычными двигателями постоянного тока обладают подобными характеристиками, но не имеют скользящих контактов. Поэтому они поэтому работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т.п. [1] – [4]. Характеристики БДПТ – удельная мощность, КПД и другие – зависят от распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора и

и тока в секциях ЯО. Также получены выражения для электромагнитной мощности и мощности, потребляемой ЯО. В результате исследования выражений для указанных мощностей получены уравнения и выражения, позволяющие определять значения отношения ЭДС к напряжению питания и угла опережения коммутации, соответствующие максимальному электромагнитному КПД, приведены примеры расчета таких значений. Показано, как полученные результаты следует использовать при проектировании и разработке БДПТ для известных значений мощности, скорости вращения вала двигателя и его КПД.

**Ключевые слова:** обычная и торoidalная обмотки, цилиндрические индукторы с различным числом полюсов, электромагнитная и потребляемая мощности, оптимальные коэффициент ЭДС и угол опережения коммутации.

способа управления током в секциях якорной обмотки (ЯО) по положению ротора. Возможны два способа управления током.

Первый, дискретный способ, обеспечивает при повороте ротора поочередное подключение секций ЯО к источнику питания и отключение их от источника. При желаемой трапецеидальной форме ЭДС и оптимальных моментах подключений секций к источнику форма тока в каждой секции близка к трапецеидальной.

*Electromagnetic processes have been investigated for two non-contact DC motors (BDPT), containing a three-section anchor winding (JA), three power transistors and two cylindrical inductors-a magnet. In one BDPT, nuclear weapons are ordinary, drum, and the numbers of the radial poles of the two inductors differ three-fold. In another BDPT, YAO is a toroidal one, and the numbers of the radial poles of the two inductors differ by a factor of two. Electromagnetic processes have been investigated with allowance for the distribution of the resultant magnetic induction along the circumference of the air gap and the inductance of the NW sections. The study obtained the expression for the EMF, the current in sections of nuclear weapons, electromagnetic power, the power consumption of nuclear weapons, as well as – equations and expressions, allowing to determine the optimum value of the ratio of EMF to the supply voltage and the advance angle switching. It is shown how the results should be use in the design and development of BDPT.*

**Keywords:** conventional and toroidal windings, cylindrical inductors with different number of poles, electromagnetic and consumed power, optimal EMF coefficient and lead advance angle.

Трапецеидальная форма ЭДС возможна при трапецеидальном распределении магнитной индукции по окружности воздушного зазора. БДПТ с дискретным способом управления током посвящены, например [2], [5] – [13].

Второй, аналоговый способ управления, обеспечивает при повороте ротора токи в секциях ЯО, изменяемые путем позиционной непрерывной или широтно-импульсной модуляции фазных

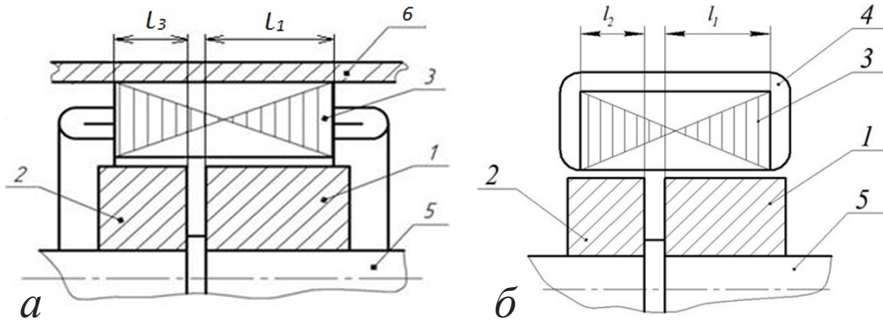


Рис. 1. Продольное сечение электромеханической части БДПТ с обычной ЯО (а) и с тороидальной ЯО (б): 1 – основной индуктор; 2 – дополнительный индуктор; 3 – якорь; 4 – катушка ЯО; 5 – вал; 6 – корпус

напряжений. Желательно, чтобы токи изменялись синусоидально и было также синусоидальным распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора. БДПТ с аналоговым способом управления током посвящены, например, [7], [14], – [16].

Чаще всего применяют БДПТ с дискретным управлением благодаря их более простому устройству. Обычно применяют БДПТ с трехсекционной ЯО, шестью силовыми транзисторами при двухполярной коммутации или с тремя силовыми транзисторами при однополярной коммутации секций ЯО по положению ротора [5], [6]. Индуктор выполняют в виде магнита-звездочки или составным из внутреннего магнитомягкого основания и наружных полюсов-магнитов.

В [13] рассмотрены два БДПТ с трехсекционной ЯО, тремя силовыми транзисторами и двумя простыми цилиндрическими индукторами-магнитами с различным числом радиальных полюсов. Здесь исследуются электромагнитные процессы для БДПТ, рассмотренных в [13]. На рис. 1 изображены продольные сечения электромеханической части таких БДПТ с обычной и тороидальной ЯО.

Основной и дополнительный индукторы – цилиндрические магниты с радиальными полюсами, дополнительный индуктор имеет утроенное (а) или удвоенное (б) число полюсов, якорь содержит магнитопровод и обычную барабанную (а) или тороидальную (б) ЯО. Обычная ЯО – диаметрально сосредоточенная, тороидальная ЯО состоит из катушек, намотанных вокруг магнитопровода якоря.

Вначале рассмотрим вопросы, касающиеся магнитной индукции в воздушном зазоре. На рис. 2а показано упрощенное распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: от воздействия каждого и обоих индукторов в БДПТ по рис. 1, а. Координата окружности зазора представлена углом  $\alpha$ .

Считаем, что:

$$b_1 = B_{m1} \cdot \sin \alpha, \quad b_3 = B_{m3} \cdot \sin 3\alpha, \\ B_{m3}/B_{m1} = 0,75.$$

Распределение результирующей для ЯО магнитной индукции  $b$  выразим следующим образом:

$$b = \frac{l_1 \cdot b_1 + l_3 \cdot b_3}{l_1 + l_3} = \frac{l_1}{l_1 + l_3} \bar{b} B_{m1},$$

где  $\bar{b}$  – относительная результирующая для ЯО магнитная индукция,

$l_1$  и  $l_3$  – активные длины индукторов 1 и 2, см. рис. 1, а.

В [13] установлено, что при  $l_1 = 3(l_1 + l_3)/4$ ,  $l_3 = (l_1 + l_3)/4$  распределение результирующей магнитной индукции  $b$  наиболее близко к желаемому трапецеидальному (см. рис. 2), а пульсация магнитной индукции минимальна, при этом:

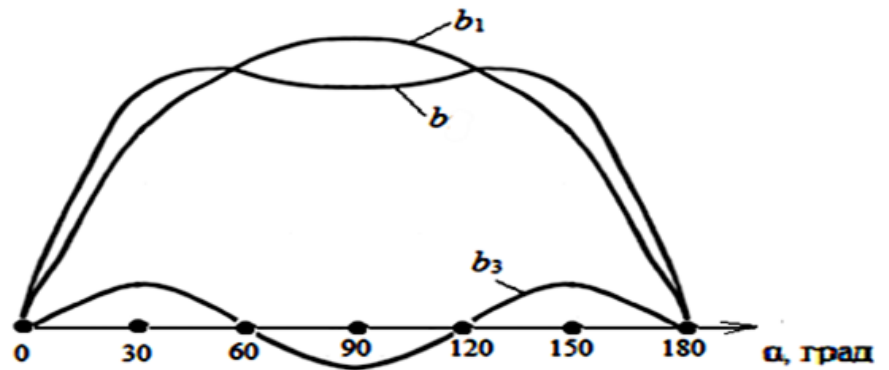


Рис. 2. Упрощенное распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции:  $b_1$  – от воздействия основного индуктора,  $b_3$  – от воздействия дополнительного индуктора,  $b$  – от воздействия обоих индукторов

$$\bar{b} = \sin \alpha + 0,25 \cdot \sin 3\alpha$$

На угловом интервале  $\alpha = 30^\circ - 150^\circ$  минимальное значение относительной индукции  $\bar{b}_{\min} = \bar{b}(30^\circ) = 0,75$ , а ее максимальное значение  $\bar{b}_{\max}$  определим из условия:

$$\frac{\partial \bar{b}}{\partial \alpha} = \cos \alpha + 0,75 \cdot \cos 3\alpha = \\ \cos \alpha (1,25 - 3 \cos^2 \alpha) = 0$$

Получим:

$$\alpha = 90^\circ \text{ и}$$

$$\alpha_m = \arccos \sqrt{1,25/3} = 49,8^\circ,$$

Пульсация магнитной индукции

$$\delta = \frac{\bar{b}_{\max} - \bar{b}_{\min}}{\bar{b}_{\max} + \bar{b}_{\min}} = 0,085$$

Среднее значение относительной индукции  $\bar{b}$  на интервале  $\alpha = 30^\circ - 150^\circ$ :

$$\bar{b}_{\text{cp}} \approx \frac{\bar{b}_{\min} + \bar{b}_{\max}}{2} = \delta = 0,82$$

Отсюда отклонение магнитной индукции от ее среднего значения:

$$\frac{\bar{b}_{\min} - \bar{b}_{\max}}{2} = \delta \bar{b}_{\text{cp}}$$

Решив уравнение:  $\bar{b} = \bar{b}_{\text{cp}} = 0,82$ , получим соответствующие значения угла  $\alpha$ , равные  $35,5^\circ, 69^\circ, 111^\circ, 144,5^\circ$ .

Будем считать упрощенно, но в соответствии с рис. 2, что относительная магнитная индукция  $\bar{b}$  изменяется линейно на интервале  $\alpha = 0^\circ - 33^\circ$  от нуля до среднего значения  $\bar{b}_{\text{cp}}$ , а на интервале  $\alpha = 33^\circ - 147^\circ$  ( $180^\circ - 33^\circ$ ) – по закону, близкому к синусоидальному, с амплитудой, равной  $0,085 \cdot \bar{b}_{\text{cp}}$ , при постоянной состав-

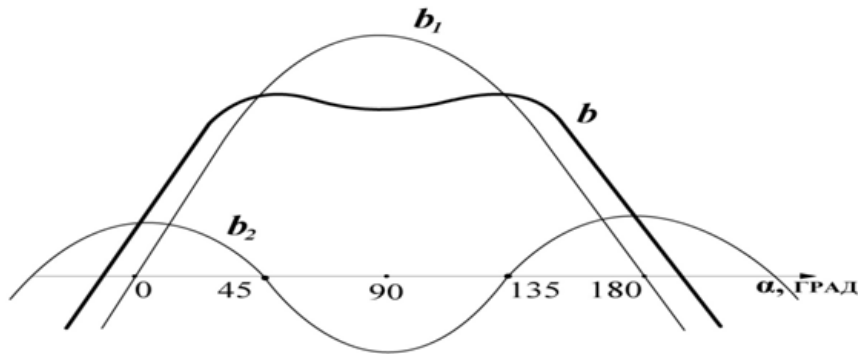


Рис. 3. Распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции:  $b_1$  – от воздействия основного индуктора;  $b_2$  – от воздействия дополнительного индуктора;  $b$  – от воздействия обоих индукторов

ляющей, хравной  $\bar{b}_{cp}$ . В этом случае можно установить, что  $\bar{b} = \bar{b}_{cp}$  при значениях угла  $\alpha$ , близких к полученным выше, т.е. при  $33^\circ, 71^\circ, 109^\circ, 147^\circ$ .

На рис. 3 показано распределение по окружности воздушного зазора магнитной индукции: от воздействия каждого и обоих индукторов в БДПТ по рис. 1, б.

Считаем, что  $b_1 = B_{m1} \cdot \sin \alpha$ ,  $b_2 = B_{m2} \cdot \cos 2\alpha$ ,  $B_{m2}/B_{m1} = 0,75$ .

Распределение результирующей для ЯО магнитной индукции  $b$  выразим следующим образом:

$$b = \frac{l_1 \cdot b_1 + l_2 \cdot b_2}{l_1 + l_2} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \bar{b} B_{m1},$$

где  $\bar{b}$  - относительная результирующая для ЯО магнитная индукция,  $l_1$  и  $l_2$  - активные длины индукторов 1 и 2, см. рис. 1, б.

В [13] установлено, что при  $l_1 = 9(l_1 + l_2)/13$ ,  $l_2 = 4(l_1 + l_2)/13$  распределение результирующей магнитной индукции  $b$  наиболее близко к желаемому трапецеидальному (см. рис. 3), а пульсация магнитной индукции минимальна,

$$\bar{b} = \sin \alpha + \frac{1}{3} \cdot \cos 2\alpha = \sin \alpha + \frac{1}{3} \cdot (1 - 2 \cdot \sin^2 \alpha)$$

На угловом интервале  $\alpha = 30^\circ - 150^\circ$  минимальное значение относительной индукции  $\bar{b}_{min} = \bar{b}(30^\circ) = 0,6667$ , ее максимальное значение  $\bar{b}_{max} = \bar{b}(48,6^\circ) = 0,7073$ , среднее значение:  $\bar{b}_{cp} = 0,69$ , а пульсация равна 0,029 [13]. Т.е. пульсация индукции  $b$  является незначительной, и поэтому ею пренебрегаем.

Решив уравнение:  $\bar{b}_{min} = 0$ , получим соответствующие значения угла  $\alpha$ , равные  $-16,5^\circ$  и  $196,5^\circ$  (см. рис. 3).

Решив уравнение:  $\bar{b} = \bar{b}_{cp} = 0,69$ , получим значения угла  $\alpha$ , равные  $36^\circ$  и  $144^\circ$ . Будем считать упрощенно, но в соответствии с рис. 3, что результирующая индукция  $b$  на угловом интервале  $-16,5^\circ \div 33^\circ$  изменяется линейно, а на интервале  $\alpha = 330 \div 1470$  она не изменяется.

На рис. 4 изображены упрощенные осциллограммы напряжения  $U$  на секции ЯО, ЭДС вращения  $e$  и тока  $i$ , в секции ЯО, не учитывающие переменные составляющие ЭДС и тока на угловом интервале, где ЭДС и ток показаны неизменными.

Здесь:  $T = 20/(p \cdot n)$  - период коммутации, или время подключения секции к источнику питания;  $n$  - число оборотов ротора в минуту;  $p$  - число пар полюсов двигателя;  $\vartheta = \theta_d / 120^\circ$  - относительный угол опережения коммутации;  $\theta_d$  - электрический угол смещения датчика положения ротора (ДПР) из нейтрального положения против направления вращения вала двигателя с целью увеличения мощности и КПД двигателя;  $\vartheta \cdot T$  и  $T_c$  - времена нарастания и спада тока;  $E$  и  $(U - E) / r$  - максимальные значения ЭДС

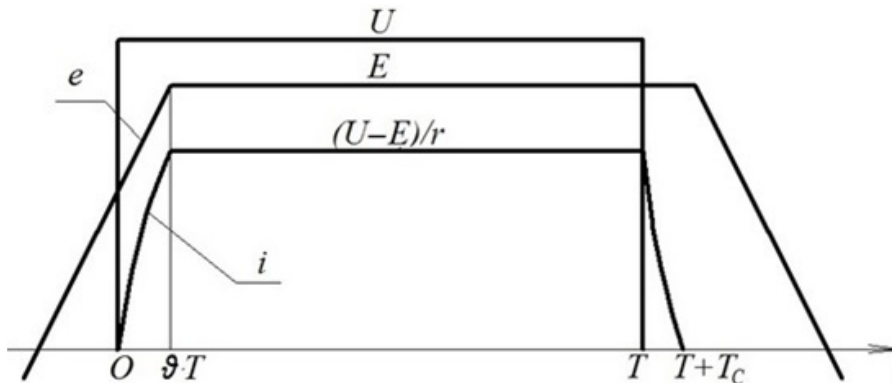


Рис. 4. Упрощенные осциллограммы напряжения  $U$  на секции ЯО, ЭДС вращения  $e$  и тока  $i$ , в секции ЯО

и тока;  $r$  - активное сопротивление секции ЯО.

Осциллограммы изображены для благоприятного, оптимального случая: форма тока совпадает с формой ЭДС, что соответствует максимальному значению электромагнитного КПД, т.е. отношения электромагнитной мощности к мощности, потребляемой ЯО. В этом случае ЭДС и ток за время  $\vartheta \cdot T$  достигают установившихся значений и не изменяются до отключения секции от источника питания.

Рассмотрим вопросы, касающиеся ЭДС в секциях ЯО, которая пропорциональна результирующей магнитной индукции  $b$ .

Левую боковую сторону такой трапеции ЭДС для первого интервала времени  $t = 0 \div \vartheta \cdot T$  (см. рис. 4) выразим следующим образом:

$$e = \left(1 - d \vartheta + \frac{d}{T} \cdot t\right) \cdot E, \quad (1)$$

Для БДПТ по рис. 1, а  $d = 120^\circ / 33^\circ = 3.64$ .

Такое значение  $d$  справедливо, так как при нейтральном положении ДПР ( $\theta = 0, \vartheta = 0$ ) и при  $t = 0$   $e = E$ , а при  $\vartheta = 33^\circ / 120^\circ$  и  $t = 0$   $e = 0$ . Для БДПТ по рис. 1, б  $d = 1200 / (330 + 16,50) = 2,42$ . При  $\theta = 0, \vartheta = 0$  и  $t = 0$   $e = E$ , а при  $\vartheta = (330 + 16,50) / 1200$  и  $t = 0$   $e = 0$ .

На втором интервале времени  $t = \vartheta \cdot T \div \vartheta \cdot T + 0,95 T$  [ $0,95 = (147 - 33) / 120^\circ$ ] в БДПТ по рис.1, а ЭДС  $e$  как пропорциональная индукции  $b$  изменяется по закону, близкому к синусоидальному, с амплитудой, равной  $0,085 \cdot E$ , при постоянной составляющей, хравной  $E$ , т.е. амплитуда переменной составляющей ЭДС в 11,8 раз меньше постоянной составляющей  $E$ . К тому же индук-

тивное сопротивление секций ЯО увеличивает их сопротивление и поэтому демпфирует (уменьшает) переменный ток в секциях ЯО. Следовательно переменные составляющие ЭДС и тока влияют на электромагнитные процессы незначительно, и поэтому ими пренебрегаем. А в БДПТ по рис. 1,6 пульсации магнитной индукции составляет всего 0,029 (см. выше), и поэтому переменными составляющими ЭДС и тока также пренебрегаем.

Рассмотрим непосредственно электромагнитные процессы в БДПТ. Для указанного оптимального случая вначале найдем выражения для токов  $\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3$ , т.е. для отношений токов  $i_1, i_2, i_3$  на первом, втором и третьем интервалах времени к току в секции ЯО при пуске двигателя, равному  $U/r$ .

Обозначим:  $\varepsilon = \frac{E}{U}$  – коэффициент ЭДС;  $\tau = \frac{L}{r}$  – электрическая

постоянная времени секции ЯО;  $L$  – индуктивность секции. Взаимной индуктивностью секций пренебрегаем, так как ЯО – диаметрально сосредоточенная, при этом в пазах якоря лежат проводники только одной секции, и поэтому магнитная связь между секциями незначительна.

$\beta = \frac{T}{\tau}$  – отношение, учитывающее влияние индуктивности ЯО на время нарастания и спада тока в секциях ЯО (см. ниже).

Для первого интервала времени  $t = 0 - \vartheta \cdot T$  (см. рис. 4) справедливо уравнение равновесия напряжений в якорной цепи:

$$\bar{i}_1 + \tau \cdot \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \frac{e}{U} = 1.$$

Решив это уравнение с учетом формулы (1), получим выражение для относительного тока  $\bar{i}_1$ :

$$\bar{i}_1 = s \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - d \cdot \varepsilon \cdot \frac{t}{T}, \quad (2)$$

где  $s = 1 - \varepsilon + d \cdot \varepsilon \cdot \vartheta + d \cdot \frac{\varepsilon}{\beta}$  (3)

При  $t = \vartheta \cdot T$  должно быть в соответствии с рис.4 и (2):

$$\bar{i}_1(\vartheta \cdot T) = 1 - \varepsilon = s \cdot \left(1 - e^{-\beta \cdot \vartheta}\right) - d \cdot \varepsilon \cdot \vartheta$$

Отсюда с учётом формулы (3) получим выражение:

$$1 - \varepsilon^{\beta \cdot \vartheta} + \beta \cdot \vartheta + \beta \cdot (1 - \varepsilon)/(d \cdot \varepsilon) = 0 \quad (4)$$

Так как  $\varepsilon^{\beta \cdot \vartheta} \approx 1 + \beta \cdot \vartheta + \beta^2 \cdot \vartheta^2/2$ , то:

$$\vartheta \approx \sqrt{\frac{2(1 - \varepsilon)}{d \cdot \beta \cdot \varepsilon}} \quad (5)$$

Очевидно, что при  $\tau = 0$ , т.е. при  $\beta = \infty : \vartheta = 0$ , и что чем меньше  $\beta$  и  $\varepsilon$ , тем больше относительный угол  $\vartheta$ .

С целью упрощения выражения (2) считаем; что ток  $\bar{i}_1$  изменяется линейно:

$$\bar{i}_1 = (1 - \varepsilon) \cdot \frac{t}{\vartheta \cdot T} \quad (6)$$

Такое допущение оправдано тем, что первый интервал значительно меньше второго, ЭДС и ток на первом интервале возрастают, а на втором интервале они максимальные как установившиеся.

На втором интервале времени  $t = \vartheta \cdot T - T$  (см. рис. 4) для относительного тока справедливо выражение:

$$\bar{i}_2 = 1 - \varepsilon \quad (7)$$

Для третьего интервала времени  $t = T - T + T_c$  (см.рис.4) с целью упрощения выражений считаем, что за время  $T_c$  относительный ток спадает от  $1 - \varepsilon$  до нуля линейно. Время  $T_c$  спада тока до нуля зависит от вида электрических цепей, предохраняющих транзисторы от перенапряжения, и от времени нарастания тока  $\vartheta \cdot T$ . Оно тем больше, чем больше  $\vartheta \cdot T : T_c = \gamma \cdot \vartheta \cdot T$ , где  $\gamma \approx 0,3 - 0,7$ .

Тогда:

$$\bar{i}_3 = (1 - \varepsilon) \cdot \left(1 - \frac{t - T}{\gamma \cdot \vartheta \cdot T}\right) \quad (8)$$

Найдем выражения для относительных мощностей  $\bar{P}_{ЭМ}$  и  $\bar{P}_{П}$ , т.е. для отношений абсолютных электромагнитной мощности  $P_{ЭМ}$  и мощности, потребляемой ЯО, к мощности, потребляемой ЯО при пуске двигателя:

$$\bar{P}_{П} = P_{П} r/U^2, \quad \bar{P}_{ЭМ} = P_{ЭМ} r/U^2$$

Согласно рис. 4:

$$\bar{P}_{П} = \frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^{\vartheta \cdot T} \bar{i}_1 \cdot dt + \int_{\vartheta \cdot T}^T \bar{i}_2 \cdot dt\right), \quad (9)$$

$$\bar{P}_{ЭМ} = \frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^{\vartheta \cdot T} \frac{e}{U} \cdot \bar{i}_1 \cdot dt + \int_{\vartheta \cdot T}^T \varepsilon \cdot \bar{i}_2 \cdot dt + \int_T^{T+T_c} \varepsilon \cdot \bar{i}_3 \cdot dt\right) \quad (10)$$

Из формул (9), (10) с учетом формул (1), (6), (7), (8) получим конечные выражения:

$$\bar{P}_{П} \approx (1 - \varepsilon) \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{2}\right) \quad (11)$$

$$\bar{P}_{ЭМ} \approx \varepsilon \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{2} - \frac{d}{6} \cdot \vartheta^2 + \frac{\gamma \cdot \vartheta}{2}\right) \quad (12)$$

Полученные выражения для относительных электромагнитной и потребляемой мощностей позволяют определять оптимальные значения коэффициента ЭДС  $\varepsilon$  и относительного угла  $\vartheta$  при известных значениях электромагнитного КПД  $\eta_{ЭМ}$  и отношения  $\beta$ . Значение  $\eta_{ЭМ}$  больше значения КПД двигателя  $\eta_{Д}$  так как  $\eta_{ЭМ}$  учитывает только омические потери в ЯО. Значение  $\beta$  согласно [1] тем меньше, чем больше значения мощности, скорости вращения вала и габаритов БДПТ. Для мощности двигателя примерно до (40 – 60) Вт  $\beta \geq 1$ . Оптимальные значения  $\varepsilon$  и  $\vartheta$  можно определить наиболее точно путем решения системы двух уравнений. Первое уравнение – (4), а второе уравнение:

$$\eta_{ЭМ} = \bar{P}_{ЭМ}/\bar{P}_{П} = \varepsilon \left[1 + \left(\frac{\gamma \cdot \vartheta}{2} - \frac{d}{6} \cdot \vartheta^2\right) / \left(1 - \frac{\vartheta}{2}\right)\right] \quad (13)$$

Согласно (5):

$$\varepsilon \approx \varepsilon(\vartheta) \approx 1 / (1 + d \beta \vartheta^2/2) \quad (14)$$

Преобразовав уравнение (13) с учетом (14), получим кубическое уравнение с одним неизвестным  $\vartheta$ :

$$c\vartheta^3 - q\vartheta^2 + g\vartheta + v = 0, \quad (15)$$

где:  $c = \eta_{ЭМ}\beta$ ,  $q = 2\eta_{ЭМ}\beta + 0,667$ ,  $g = 2(\eta_{ЭМ} + \gamma - 1)/d$ ,  $v = 4(1 - \eta_{ЭМ})/d$

Для БДПТ по рис. 1, а и по рис. 1,6 соответственно  $d = 3,64$  и  $d = 2,42$ , а  $\gamma \approx 0,5$ , (см. выше).

Пренебрегая малым членом  $c\vartheta^3$ , получим квадратное уравнение:  $Q\vartheta^2 - g\vartheta - v = 0$ , решение которого:

$$\vartheta = \frac{g + \sqrt{g^2 + 4qv}}{2q} \quad (16)$$

Определив из уравнения (15) или по формуле (16) значение  $\vartheta$ , найдем значение  $\varepsilon$  по формуле (14).

Пренебрегая двумя малыми членами  $c\vartheta^3$  и  $g\vartheta$  в уравнении (15), получим простое выражение для  $\vartheta$  в явном виде:

$$\vartheta = \frac{\sqrt{v/q} = \sqrt{1,1 (1 - \eta_{ЭМ})}}{(2 \eta_{ЭМ} \beta + 0,667)}$$

Из этой формулы и формулы (14) видно, что чем больше значение электромагнитного КПД  $\eta_{ЭМ}$ , тем меньше значение  $\vartheta$ , но больше значение  $\varepsilon_\varepsilon$  и что при уменьшении значения  $\beta$   $\vartheta$  и  $\varepsilon_\varepsilon$  увеличиваются значения  $\vartheta$  и  $\varepsilon_\varepsilon$ . Ниже приведены результаты расчетов значений и для БДПТ по рис. 1, а, подтверждающие указанные выводы. При  $\beta = 2$  и  $\eta_{ЭМ} = 0,75$ ,  $\varepsilon_\varepsilon = 0,762$ ,  $\vartheta = 0,293$ ; при  $\beta = 2$  и  $\eta_{ЭМ} = 0,85$ ,  $\varepsilon_\varepsilon = 0,843$ ,  $\vartheta = 0,226$ ; при  $\beta = 1$  и  $\eta_{ЭМ} = 0,85$ ,  $\varepsilon_\varepsilon = 0,853$ ,  $\vartheta = 0,308$ ; при  $\beta = 10$  и  $\eta_{ЭМ} = 0,85$ ,  $\varepsilon_\varepsilon = 0,841$ ,  $\vartheta = 0,102$ .

Результаты исследования электромагнитных процессов можно и нужно использовать для оптимального проектирования и разработки БДПТ. При проектировании известны номинальные значения напряжения питания, мощности, скорости вращения вала двигателя и КПД  $\eta_{Д}$ . Необходимо предварительно определить значения отношения  $\beta$ , например, как указано в [5], [11], и электромагнитного КПД  $\eta_{ЭМ}$  по формуле:  $= (1,07 \div 1,15)$ .

Зная значения  $\beta$  и  $\eta_{ЭМ}$ , можно определить оптимальные значения  $\varepsilon_\varepsilon$  и  $\vartheta$ , как указано выше, а по ним – относительных мощностей  $\overline{P}_{П}$ ,  $\overline{P}_{ЭМ}$  остальных характеристик и параметров двигателя.

### Выводы

Электромагнитные процессы исследованы для бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ) с обычной, барабанной и с тороидальной якорной обмотками (ЯО). Получены выражения для электромагнитной мощности и мощности, потребляемой ЯО. В результате исследования этих выражений получены уравнения и выражения, позволяющие определять значения отношения ЭДС к напряжению питания и угла опережения коммутации, соответствующие максимальному электромагнитному КПД.

Приведены примеры расчета таких значений. Показано, как полученные результаты следует использовать при проектировании и разработке БДПТ для известных значений мощности, скорости вращения вала двигателя и его КПД.

### Литература

1. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985, 368 с.
2. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2003 – 424 с.
3. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1985, 250 с.
4. Зимин Е. Н., Кацевич В. Л., Козырев С. К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями: – Энергоиздат, 1981, 192 с.
5. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1975, 128 с.
6. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Наука, 1979, 270 с.
7. Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988, 184 с.
8. Овчинников И. Е. Теория вентильных электрических двигателей. Л.: Наука, 1985, 148 с.
9. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами, пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991, 229 с.
10. Штеллинг Г., Байссе А. Электрические микромашины: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1991, 229 с.
11. Гридин В.М. Моделирование и оптимизация электромагнитных процессов для маломощных бесконтактных двигателей постоянного тока. – Вестник МГТУ им Н.Э.Баумана, Серия Машиностроение, № 3, 2007, – с. 48 – 61.
12. Гридин В.М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока. – Вестник МГТУ им Н.Э.Баумана, Серия Машиностроение, № 2, 2011. с. 75 – 86.

13. Гридин В.М. Бесконтактные двигатели постоянного тока с трехсекционной обмоткой и двумя индукторами. – Электричество, 2021, №1, с. 55 – 60.
14. Балковой А. П., Цаценкин В. К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010 – 328 с.
15. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 223 с.
16. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.

### Гридин Владимир Михайлович

Родился в 1940 году. В 1963 окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) по специальности «Авиационное электрооборудование». Кандидат технических наук, доцент. В 1979 году защитил диссертацию по теме «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией». Опыт работы – 58 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н.Э.Баумана. Автор 80 печатных научных трудов, в том числе 1 монографии. Имеет 16 авторских свидетельств на изобретение.

### Gridin Vladimir Mikhailovich

Was born in 1940. In 1963 he graduated from the Electromechanical Faculty of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI) majoring in Aviation Electrical Equipment. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. In 1979 he defended his dissertation on the topic "Research and calculation of three-phase non-contact DC motors with half-wave commutation". He has 58-year work experience. At the moment he works as the Assistant Professor of the Electrical Engineering and Industrial Electronics Department of the Moscow State Technical University (MSTU) named after N.E. Bauman. Author of 80 printed scientific works, including 1 monograph. Has 16 inventor's certificates.