

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 №ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
А.Г. Бабак, к.т.н.

Редакционный совет:

М.П. Бадёр, д.т.н., профессор,
Л.А. Герман, д.т.н., профессор,
В.Н. Дианов, д.т.н., профессор,
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор,
К.Л. Ковалёв, д.т.н., профессор,
А.С. Космодамианский, д.т.н.,
профессор,
А.С. Мазнёв, д.т.н., профессор,
Г.Г. Рябцев, д.т.н., профессор,
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор,
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор.

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук.

Редакция:

140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томилино,
ул. Гаршина, д. 11.
Тел./факс: (495) 500-40-20,
(495) 557-23-95
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать:
___.06.2016 г.

Отпечатано:

ГУП МО «Коломенская типография».
140400, г. Коломна,
ул. III Интернационала, д. 2а.
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60x90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 688.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ, СВЯЗИ

Шаронов Г.И., Нефедьев А.И.
Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля. 2

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Гусев С.А., Приказчиков А.В., Нестерин В.А., Спиридонов А.А.
*Магнитоэлектрический генератор стабилизированного напряжения
в широком диапазоне частот вращения* 5

Косарев А.Б., Косарев Б.И.
*Расчет параметрической электрической поля в земле с неоднородной электрической
структурой при стекании тока с искусственного заземлителя* 8

Люминарская Е.С., Дианов В.Н.
*Математическая модель переходной зоны слаботочных электрических
контактов в условиях запыленности* 13

Овсянников Е.М., Клюкин П.Н., Гайтова Т.Б.
Использование водорода в автомобильном транспорте 16

Мурадов Э.Ш., Грицук А.А.
*Автоматические быстродействующие выключатели
для городского электротранспорта* 19

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Власьевский С.В., Малышева О.А., Мельниченко О.В., Грибенюк Д.В.
*Влияние тяговых и тормозных характеристик коллекторного
и асинхронного приводов на энергетическую эффективность электровозов
переменного тока* 25

Доманов В.И., Доманов А.В., Сердцева А.В.
Автоматизированная система вентиляции электродвигателя. 32

Скребков А.В., Шарапов А.А.
*Безотказность тяговых электродвигателей электропоездов серии
ЭТ-2М в различных межремонтных периодах* 35

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Петровский С.В., Козловский В.Н., Белаушкин Е.В.
*Математическое моделирование электромагнитных помех
от системы зажигания автомобиля* 37

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Козловский В.Н., Киреев К.В., Заятров А.В.
*Комплексный анализ качества электрооборудования автомобилей
по результатам гарантийной эксплуатации* 41

ИНФОРМАЦИЯ

Краснов Л.А.
*О типовом государственном (муниципальном) контракте
на выполнение НИОКР.* 47

Краснов Л.А.
*Об учете количества полученных патентов и секретов производства
(ноу-хау) при предоставлении субсидий на возмещение части затрат
на создание научно-технического задела по разработке базовых технологий
и на уплату процентов по кредитам* 47

Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля

// The microprocessor-based gearbox control system of the car engine //

**Шаронов Г.И., к.т.н., доцент,
Автомобильно-дорожный институт Пензенского государственного
университета архитектуры и строительства, г. Пенза**

**Нефедьев А.И., д.т.н., доцент,
Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград**

На основе анализа конструкций коробок перемены передач была разработана микропроцессорная система управления силовым агрегатом, позволяющая производить переключение передач в полуавтоматическом или автоматическом режимах, что облегчает управление автомобилем, обеспечивает снижение расхода топлива и повышение долговечности трансмиссии.

Ключевые слова: микропроцессорная система управления, автоматизация управления, электропневматический привод, КПП, ЭПП, МСУСА.

The microprocessor-based gearbox control system of the car engine, which allows to make gear shifting in the semi-automatic or automatic modes on the basis of the analysis of designs of gearboxes, that facilitates driving and provides decrease the fuel consumption and increase the durability of transmission, are developed.

Keywords: microprocessor-based control system, automation of management, electro-pneumatic actuator, gearbox.

В настоящее время изменение тягового усилия на ведущих колесах автомобилей осуществляется путем изменения передаточного отношения в элементах трансмиссии. При этом основными проблемами в процессе переключения передач являются отсутствие возможности перекрытия передач, разрыв потока мощности, существенные потери времени на процесс переключения, а также проблемы, связанные со скоростью восстановления потока мощности (включения передачи).

Основной тенденцией современного автомобилестроения, наряду с совершенствованием механических трансмиссий, является непрерывное увеличение доли автоматизированных и автоматических трансмиссий. Причем одними из основных задач в процессе переключения передач в трансмиссиях такого типа являются уменьшение времени разрыва потока мощности и, следовательно, уменьшение потерь на процесс переключения передач.

В настоящее время активно ведутся разработки в области автоматизации

механических трансмиссий грузовых и легковых автомобилей, что является основой для разработки новых технических решений. Например, полуавтоматические трансмиссии широко применяются на различных моделях грузовых автомобилей и автобусов.

Известно, что существующие ступенчатые КПП способны передавать большой крутящий момент, имеют высокую надежность и относительно небольшие габариты [1].

Все еще широко применяемые механические коробки перемены передач (КПП) способны передавать большой крутящий момент, имеют высокую надежность и относительно небольшие габариты, существенно меньшую стоимость, чем у существующих типов автоматических трансмиссий, однако имеют большое время переключения передачи, в значительной степени зависящее от водителя и требующее выключения сцепления [1].

Их недостатки могут быть устранены путем управления частотой вращения коленчатого вала двигателя, что также позволяет в значительной степени

снизить время переключения путем осуществления режима работы без разрыва силового потока, а также дает возможность расширить диапазон передаточных чисел КПП.

Присущие механическим КПП недостатки, такие как «длинные передачи», значительные временные диапазоны переключения передач, обусловленные необходимостью выравнивания окружных скоростей за счет работы синхронизаторов, что требует выключения сцепления (одно-, двухразовое), можно исключить посредством центральной синхронизации окружных скоростей, что позволит осуществить переключение передач как вниз, так и вверх без выключения сцепления [2].

Для реализации такого метода управления КПП, заключающегося в автоматической синхронизации угловых скоростей входного и выходного силовых потоков и позволяющего осуществлять переключение передач без выключения сцепления, была разработана микропроцессорная система управления силовым агрегатом (МСУСА). Применение МСУСА позволит оптимизировать работу ДВС вне зависимости от нагрузки, передаваемой на ведущие колеса.

Вначале МСУСА формирует законы переключения передач с учетом двух основных параметров, характеризующих условия эксплуатации автомобиля (скорость его движения и положение педали подачи топлива) и обеспечивает выравнивание частот вращения ведущих и ведомых элементов КПП между собой и с эталонными значениями. Передача включается строго в момент синхронизации, то есть когда время, оставшееся до выравнивания угловых скоростей шестерни включаемой передачи и вторичного вала, равно времени срабатывания механизма включения передач.

При переключении передачи, например, вверх МСУСА прекращает подачу топливовоздушной смеси в двига-

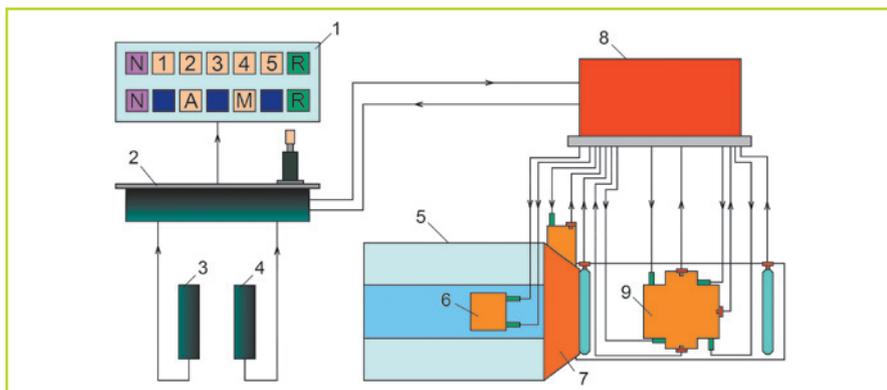


Рис. 1. Структурная схема МСУСА:

1 – блок индикации; 2 – электронный блок системы управления; 3 – педаль тормозная; 4 – педаль подачи топлива; 5 – двигатель; 6 – исполнительный механизм; 7 – сцепление; 8 – электронный блок управления коробкой перемены передач; 9 – электропневматический привод коробки перемены передач.

тель, что приводит к плавному уменьшению потока мощности и выключению предыдущей передачи. В момент синхронизации, то есть когда время, оставшееся до выравнивания частоты вращения вторичного вала и частоты вращения шестерни включаемой передачи, равно времени срабатывания механизма управления ДВС, начинается процесс включения передачи, и к моменту выравнивания угловых скоростей шестерни включаемой передачи и вторичного вала КПП процесс переключения передачи завершается [3].

Разработанная МСУСА предназначена для автоматизации управления силовым агрегатом большегрузных автомобилей и автобусов, состоящим из дизельного двигателя, дискового сцепления и ступенчатой механической коробки передач, и обеспечивает:

- выбор номера передачи и момента переключения передач;
- организацию процесса переключения передач.

Применением МСУСА обеспечиваются облегчение управления автомобилем, снижение расхода топлива, повышение долговечности трансмиссии и уменьшение токсичности отработанных газов [4].

Структурная схема МСУСА приведена на рис. 1.

В конструкцию МСУСА входят пять основных блоков: задатчик режимов движения, электронный блок системы управления, блок индикации, электронный блок коробки передач и исполнительный механизм.

МСУСА работает в трех режимах: автоматическом, полуавтоматическом и ручном.

В автоматическом режиме выбор номера передачи, выбор момента переключения передач и процесс переключения передач осуществляются автоматически.

Полуавтоматический режим характеризуется тем, что выбор номера передачи осуществляет водитель, а процесс переключения передач осуществляется автоматически, то есть полностью под управлением электроники.

При включении первой передачи как в автоматическом, так и в полуавтоматическом режиме и при включении заднего хода необходимо выключить сцепление и затем, при трогании автомобиля, его включить.

Во время движения автомобиля реализуется так называемая двухпедаль-

ная схема управления, то есть водитель управляет лишь педалью подачи топлива и педалью тормоза, а управлять педалью сцепления при переключении передач нет необходимости. При переключении передач микропроцессорная система управляет силовым агрегатом автомобиля таким образом, что сцепление вообще не размыкается.

В автоматическом режиме выбор номера передачи осуществляется автоматически, причем автомобиль может двигаться при этом как в экономичном, так и в динамичном режиме. Зависит это от того, как водитель управляет педалью подачи топлива.

В процессе работы над системой управления на серийную КПП был установлен электропневматический привод (ЭПП) [5–9], предназначенный для дистанционного управления коробками передач КАМАЗ моделей 14 и 141. Такая разработка представляет собой альтернативу гидромеханической коробке передач «Львов 3» автобусов ЛиАЗ 5256, обеспечивая сочетание легкости и экономичности механической КПП и удобства автоматической КПП.

ЭПП состоит из следующих основных узлов:

- исполнительный механизм коробки передач;
- рычаг управления коробкой передач;
- блок контроля;
- датчик состояния сцепления;

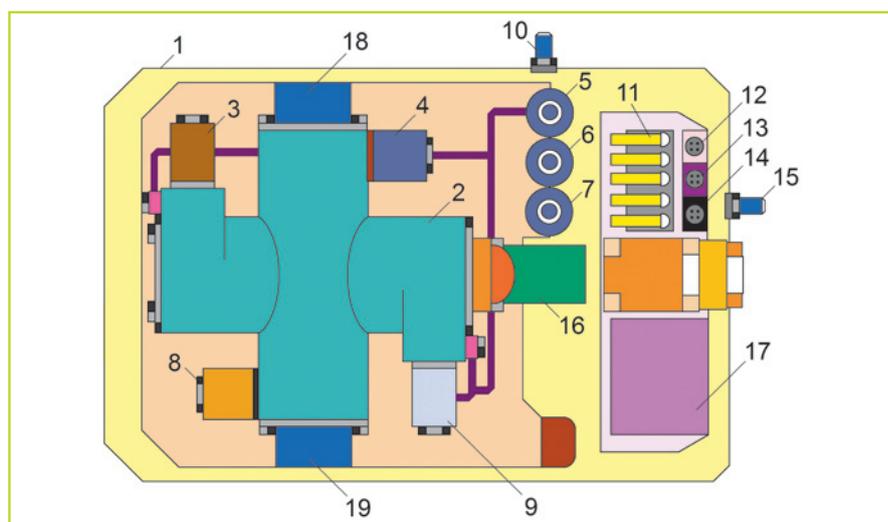


Рис. 2. Электропневматический привод КПП:

1 – основание; 2 – корпус механизма выбора и включения передачи; 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 – электропневматические клапаны ЭПК1, ЭПК2, ЭПК3, ЭПК4, ЭПК5, ЭПК6, ЭПК7; 10 – штуцер входной; 11 – клеммник клапанов; 12, 13, 14 – разъемы датчиков В1, В2 и В3; 15 – штуцер выходной; 16 – датчик трехпозиционный В3; 17 – плата с балластными резисторами; 18, 19 – датчики двухпозиционные В1.

- механизм блокировки;
- жгут соединительный.

Конструктивная схема одного из вариантов электропневматического привода КПП представлена на рис. 2.

Установка ЭПП не требует каких-либо доработок серийной коробки передач. Электрическое питание ЭПП осуществляется от бортовой сети автотранспортного средства:

- номинальное напряжение – 24 В;
- рабочее напряжение – 20...28 В.

Пневматическое питание ЭПП осуществляется от бортовой пневмосистемы автотранспортного средства (номинальное давление воздуха – 0.7 Мпа).

Усилие перемещения рычага управления ЭПП не превышает усилия на рычаге управления коробкой передач легкового автомобиля.

ЭПП имеет необходимые блокировки, обеспечивающие безопасность движения при управлении коробкой передач.

Внешний вид КПП с исполнительным механизмом представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид КПП с исполнительным механизмом.

Для переключения передач в коробке передач в ручном режиме (при выходе из строя электронной системы управления силовым агрегатом) необходимо выжать педаль сцепления и перевести рычаг управления коробкой передач в положение включаемой передачи, при этом осуществляется непосредственное управление электропневматическими клапанами. После включения требуемой передачи, о чем свидетельствуют световая индикация на блоке контроля, нужно отпустить педаль сцепления.

МСУСА открыта для дальнейшего развития и сопряжения с другими электронными системами автомобиля. МСУСА предполагается развивать в следующих направлениях:

- автоматизация управления двигателем;
- совершенствование конструкции существующей системы и алгоритмов управления переключением передач;
- автоматизация управления сцеплением, то есть автоматизация процесса трогания автомобиля.

Таким образом, применение МСУСА облегчает управление автомобилем, обеспечивает снижение расхода топлива и повышение долговечности трансмиссии.

Литература

1. Конструкция автомобиля. Шасси. / под общ. ред. А.Л. Карунина – М.: МАМИ, 2000. – 528 с.
2. Пат. № 2015039 РФ, МКИ В 60 К 41/06. Способ переключения передач в автоматизированной ступенчатой коробке передач / А.И. Рябков, В.П. Топорков, Г.И. Шаронов, Л.И. Аникин, Н.Е. Паршин (Россия). – № 5002756/27; заявл. 17.09.91; опубл. 15.07.94, бюлл. № 10.
3. Пат. № 2015936 РФ, МКИ В 60 К 20/00. Механизм автоматизированного переключения передач в механической ступенчатой коробке передач / Н.Е. Паршин, В.П. Топорков, Л.М. Аникин, А.И. Рябков, Г.И. Шаронов, Е.М. Осипов (Россия). – № 4949439/27; заявл. 27.06.91; опубл. 15.07.94, бюлл. № 13.
4. Пат. № 2015937 РФ, МПК В 60 К 20/00. Устройство дистанционного переключения передач в механической ступенчатой коробке передач / Н.Е. Паршин, В.П. Топорков, Л.М. Аникин, А.И. Рябков, Г.И. Шаронов, Е.М. Осипов (Россия). – № 4949441/27; заявл. 27.06.91; опубл. 15.07.94, бюлл. № 13.
5. Пат. № 2003907 РФ, МПК F 16 K 31/02. Трехходовой электропневматический клапан / Н.Е. Паршин, В.П. Топорков, Л.М. Аникин, Г.И. Шаронов, Е.М. Осипов (Россия). – № 05048990; заявл. 22.06.92; опубл. 30.11.93, бюлл. № 43–44.
6. Пат. № 2046238 РФ, МПК F 16 K 31/02. Электропневматический клапан / Н.Е. Паршин, В.П. Топорков, Л.М. Аникин, Г.И. Шаронов (Россия); – № 5048988/29; заявл. 22.06.92; опубл. 20.10.95, бюлл. № 29.
7. Пат. № 2046239, РФ, МПК F 16 K 31/02. Электропневматический клапан / Н.Е. Паршин, В.П. Топорков, Л.М. Аникин, Г.И. Шаронов (Россия); – № 5048989/29; заявл. 22.06.92; опубл. 20.10.95, бюлл. № 3.
8. Пат. № 2288478, РФ, МПК G01R27/26. Датчик для трехпозиционного контроля положения / Г.И. Шаронов, В.А. Кучерук, Ф.С. Ширшиков, Э.Р. Домке, Ю.В. Родионов (RU); – № 2003114585/28; заявл. 12.05.03; опубл. 27.11.06, бюлл. № 33.
9. Пат. № 96422, РФ, МПК G01B 7/14. Индуктивный (трансформаторный) первичный измерительный преобразователь положения / Г.И. Шаронов, Р.С. Шаманов, Н.И. Ша-

манова, В.Г. Шибиков, Д.Е. Жарин (RU); – № 2010108980/28; заявл. 12.13.10; опубл. 27.07.10, бюлл. № 21.

Шаронов Геннадий Иванович

Родился в 1947 году. В 1972 году окончил Пензенский завод – ВТУЗ при заводе ВЭМ, филиал Пензенского политехнического института – по специальности «Автоматика и телемеханика». Кандидат технических наук, доцент. В 1992 году защитил диссертацию по теме «Разработка средств измерения параметров пассивных двухполюсников в многополюсных электрических цепях на основе алгоритма изменения конфигурации измерительной цепи». Опыт работы – 50 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Организация и безопасность движения» Автомобильно-дорожного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза. Имеет 279 публикаций, в том числе 218 авторских свидетельств и патентов.

Нефедьев Алексей Иванович

Родился в 1965 году. В 1987 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Доктор технических наук, доцент. В 2013 году защитил диссертацию по теме «Широкодиапазонные электростатические и электродинамические компараторы переменного тока для измерений электроэнергетических величин». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета. Имеет 120 публикаций, в том числе 30 авторских свидетельств и патентов.

Sharonov Gennady

Was born in 1947. In 1972 he graduated from Penza factory – VTUZ under VEM factory, branch of Penza Polytechnic Institute, speciality is «Automatics and telemechanics». He is candidate of technical sciences. In 1992 he defended the thesis, the subject of the thesis «The development of tools for measuring the parameters of passive two-terminal circuit in multi-pole electrical circuits on the basis of the reconfiguration of algorithm of the measurement circuit ». He has 50 years work experience. At present, he is associate professor of the «Organization and traffic safety» department of Automobile and Roads Institute of Penza State University of Architecture and Construction (Penza). He has 279 academic papers, including 218 certificates of authorship and patents.

Nefed'ev Alexey

Was born in 1965. In 1987 he graduated from Penza State University in specialty of «Radiotechnics». He is candidate of technical sciences, associate professor. In 2013 he defended the thesis, the subject of thesis is «Wide-range electrostatic and electrodynamic comparators of alternate current for measurement of the electrical energy values». He has 29 years work experience. At present, he works as a professor of department «Electrical technology» of Volgograd State Technical University. He has 120 academic papers, including 30 certificates of authorship and patent.

Магнитоэлектрический генератор стабилизированного напряжения в широком диапазоне частот вращения

// The magnetolectric generator of the stabilized voltage in the wide range of rotation frequency //

Гусев С.А., Приказщиков А.В., к.т. н.,
ООО «Конструкторское бюро электроаппаратуры», г. Чебоксары

Нестерин В.А., д.т. н., профессор,
Спиридонов А.А.,
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары

Статья посвящена созданию конструкции генераторной установки постоянного тока на базе бесконтактной электрической машины с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов. Отличительной особенностью генератора является возможность регулирования и стабилизации выпрямленного напряжения на выходе в широком диапазоне частот вращения. Генераторы такого типа находят применение в качестве источников питания электронной аппаратуры цепей управления на железнодорожном транспорте, а также в ветроэнергетике, где частота вращения ветроколеса меняется в широких пределах с одновременным требованием достаточно высокой степени стабильности выходного напряжения. **Ключевые слова:** генератор, постоянный магнит, источник питания, железнодорожный транспорт, тихоходный.

В автономных системах электроснабжения зачастую приходится разделять электрическую схему генераторной установки (ГУ) на две части, независимые друг от друга. При этом силовая часть схемы получает питание от генераторов традиционного исполнения, имеющих обмотку якоря на статоре и обмотку возбуждения на роторе, что позволяет обеспечить регулирование и поддержание напряжения с достаточно высокой точностью. В то же время в целях повышения надежности работы системы в целом возникает необходимость наличия другой низковольтной и маломощной схемы системы питания элементов и узлов, обеспечивающих работу цепей управления автоматики. Для повышения

The article is devoted to creation of a construction design of a direct current electrical generator unit on the basis of the contactless electrical machine with excitation from rare-earth permanent magnets. The property of the generator is the possibility of regulation and stabilization of the rectified output voltage in the wide range of rotation frequency. This kind of generators find application as power supplies of control line the electronic equipment on railway transport, and also in windpower engineering where the rotation frequency of windwheels is change over a wide range with the simultaneous requirement of rather high level of output voltage stability.

Keywords: electrical generator unit, permanent magnet, power supply, railroad transport, slow-speed.

ресурса последних применяют различные методы: резервирование, дублирование и т.п. Перечислим основные требования и параметры, которым должна

удовлетворять генераторная установка такого типа:

- номинальное напряжение – 12 В;
- диапазон значений выходного напряжения – 7–32 В;
- диапазон изменения частоты вращения – 30–600 мин⁻¹;
- отдаваемая мощность: минимальная – 8 Вт; номинальная – 30 Вт; максимальная – 40 Вт;
- акустический шум не регламентируется;
- конструкция генератора должна обеспечивать размещение всех узлов ГУ в едином корпусе.

На рис. 1 представлена функциональная схема генераторной установки, на которой показана взаимосвязь основных узлов и элементов. Обмотка якоря генератора подключена к зажимам неуправляемого выпрямителя (НУВ), собранного по мостовой схеме. Напряжение на выходе выпрямителя линейно зависит от частоты вращения ротора и дополнительно регулируется управляемым преобразователем напряжения (УПН), представляющим собой полупроводниковый ключ, формирующий последовательность импульсов с регулируемой скважностью.

В результате на выходе схемы создается напряжение

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T U_0(t) dt. \quad (1)$$

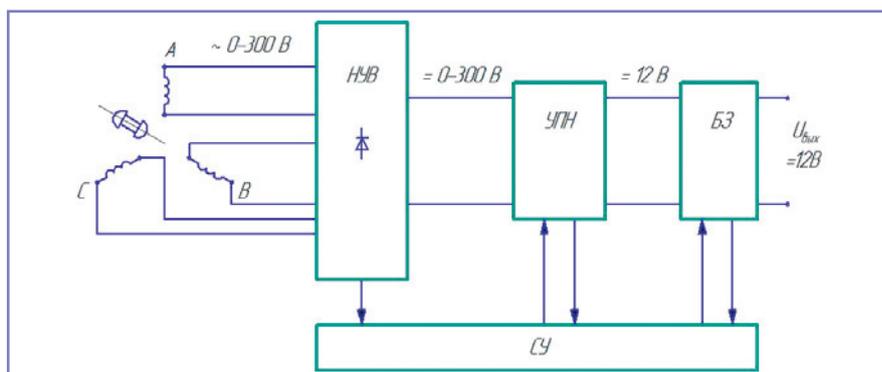


Рис. 1. Функциональная схема генераторной установки.

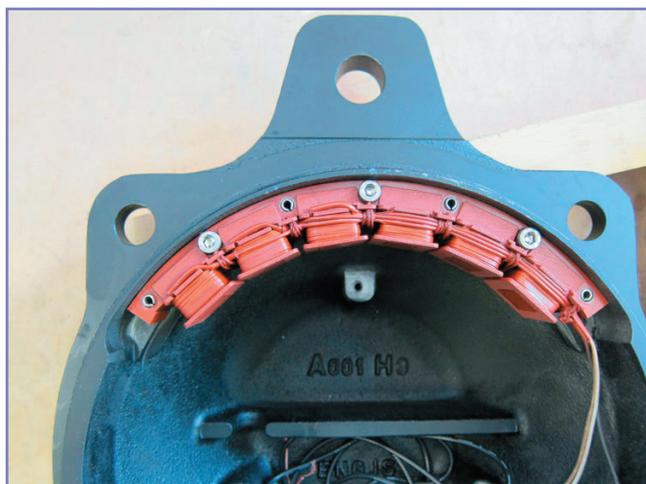


Рис. 2. Встраиваемый генератор дугостаторного типа.

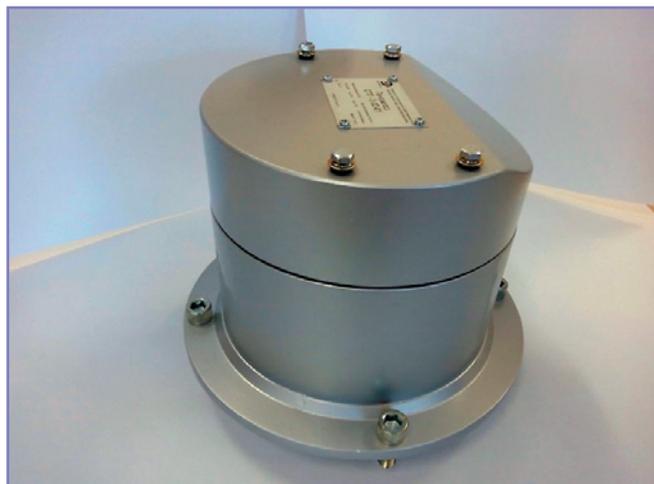


Рис. 3. Опытный образец разработанной генераторной установки.

Если на выходе выпрямителя создается последовательность импульсов длительностью t_1 и периодом T , то, полагая $U_0(t) = U_0 = \text{const}$, из формулы (1) получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0 \cdot t_1}{T} = \frac{U_0 k n t_1}{T} = \gamma k n U_0, \quad (2)$$

где γ – скважность импульсов напряжения, формируемых ключом; n – частота вращения ротора; k – коэффициент пропорциональности.

На рис. 1 условно показана схема соединения фазных обмоток генератора. Конструктивно якорная обмотка генератора выполнена по типу зубцовых катушечных обмоток, размещенных в пазах статора. Система возбуждения генератора выполнена на высококоэрцитивных постоянных магнитах (ПМ) с концентрацией магнитного потока полюсов, обеспечивающей максимальное значение индукции в рабочем зазоре машины на уровне (1–1,2) Тл [1].

Известны также другие типы электрических машин, способных обеспечить работу генератора сравнительно небольшой мощности (менее 100 Ватт) при изменении в широком диапазоне частот вращения, с одновременным поддержанием стабилизированного значения напряжения на нагрузке. Так,

в литературе [2] описан генератор аналогичного назначения дугостаторной конструкции, фотография которого приведена на рис. 2.

Для выяснения возможности создания генератора с необходимым уровнем свойств и выбора оптимального решения по конструкции, обеспечивающей наиболее высокие удельные массогабаритные показатели, были выполнены расчеты главных размеров наиболее распространенных типов магнитоэлектрических генераторов с возбуждением от ПМ. Выбор типов генераторов, предназначенных для оптимизационных расчетов, обусловлен известным и общепринятым фактом [3], согласно которому наилучшие энергетические и массогабаритные показатели на сегодняшний день имеют магнитоэлектрические машины с возбуждением от редкоземельных ПМ.

Расчеты проводились с использованием понятия машинной постоянной Арнольда [4]:

$$C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 K_{01} (A \cdot B_\delta)}, \quad (3)$$

где A – линейная нагрузка электрической машины, А/м; B_δ – магнитная индукция в рабочем воздушном зазоре, Тл; K_{01} – обмоточный коэффициент по первой гармонике.

С другой стороны, машинная постоянная связана с главными размерами электрической машины следующим соотношением:

$$D^2 l_\delta = C_A \cdot \frac{S_{ЭМ}}{n_1}. \quad (4)$$

Здесь, в выражении (4), приняты обозначения: D и l_δ – диаметр и расчетная длина ротора, м; $S_{ЭМ}$ – электромагнитная мощность, ВА; n_1 – частота вращения, мин⁻¹.

Для расчетов и последующего сравнительного анализа результатов были выбраны несколько вариантов конструкций, которые, по мнению авторов, наиболее благоприятно вписываются в компоновку магнитной системы генератора и печатной платы выпрямителя.

Выберем в качестве возможных вариантов несколько конструктивных исполнений, для которых рассчитаем по формулам (3) и (4) главные размеры. Результаты расчетов и параметры, характеризующие эти варианты, представлены в таблице 1.

Из анализа результатов, представленных в таблице 1, видно, что наиболее предпочтительным вариантом следует считать конструктивное исполнение электрической машины с тангенциальным намагничиванием ПМ. Это объясняется тем, что в данной конструкции

Таблица 1. Расчетные значения параметров и главных размеров генераторов.

№ п/п	Конструктивное исполнение	Амплитуда индукции в рабочем зазоре B_δ , Тл	Линейная нагрузка A , А/м	Эл. магн. мощн. S , ВА	Частота вращения n_1 , мин. ⁻¹	Обмот. коэфф. K_{01}	Габариты ротора, $k_m D^2 l$
1	Торцевая эл. машина	0,6	8000	30	60	0,94	19,75
2	Цилиндрическая с продольной концентрацией потока полюсов	0,75	12000	30	60	0,95	10,4
3	Цилиндрическая с тангенциальным намагничиванием и концентрацией магнитного потока полюсов	1,2	10000	30	60	0,85	8,7

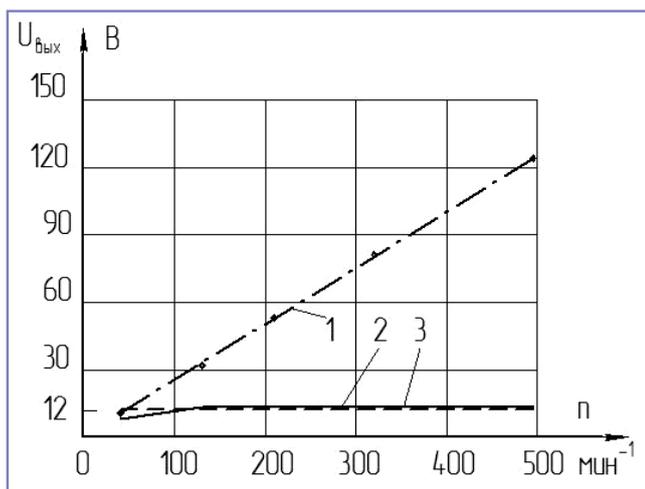


Рис. 4. Экспериментальные зависимости выходного напряжения от частоты вращения:

1 (· · ·) – без УПН; 2 (---) – с УПН без нагрузки; 3 (—) – с УПН под нагрузкой ($I_{\text{нз}} = 2,3 \text{ А}$).

имеет место концентрация потока, снимаемого с каждого полюса ротора.

По результатам расчетов авторами была разработана конструкция и изготовлен опытный образец ГУ, внешний вид которой представлен на рис. 3.

Опытный образец ГУ был изготовлен с использованием листа статора серийно выпускаемого индукторного генератора типа 40.3771, имеющего число пазов $z_1 = 15$. Число полюсов ротора – $2p = 18$. Число фаз – $m = 3$.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости выходного напряжения ГУ в функции частоты вращения, полученные в результате испытаний.

На рис. 4 представлены в графической форме результаты испытаний опытного образца. Сравнительный анализ этих результатов и выполненных выше расчетных данных показывает, что полученные параметры опытного образца на (10–15)% ниже ожидаемых расчетных. Это различие обусловлено тем, что опытный образец авторы вынуждены были изготовить на основе серийного образца индукторного типа, то есть с отступлением от оптимальных значений размеров и соотношений электромагнитной системы.

Выводы

По результатам исследовательской работы, приведенным в данной статье, можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная авторами генераторная установка постоянного тока на базе бесконтактной магнитоэлектрической машины с возбуждением от высоко-

коэнергетических редкоземельных ПМ отвечает всем основным требованиям, предъявляемым к широкорегулируемым источникам, находящим применение в автономных транспортных системах.

2. Как показали испытания опытного образца ГУ, ее параметры и характеристики не уступают по основным показателям зарубежным аналогам.

Литература

1. Нестерин В.А., Спиридонов А.А. К вопросу выбора оптимальной толщины магнитов в безредукторном электромеханическом усилителе рулевого управления // Вестник Чувашского университета. 2015, № 3. Технические науки.
2. www.waggontracker.com.
3. Нестерин В.А., Волокитина Е.В. Компоненты интеллектуальных мехатронных модулей // Чебоксары. Изд-во Чуваш. ун-та, 2014.
4. Постников И.М. Проектирование электрических машин // Государственное издательство технической литературы УССР. 1960.

Гусев Сергей Александрович

Родился в 1954 году. В 1983 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова по специальности «Электротермические установки». В настоящее время работает ведущим инженером-конструктором ООО «КБЭА».

Нестерин Валерий Алексеевич

Родился в 1941 году. В 1964 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Электрические машины». Доктор технических наук, профессор. В 1995 году защитил докторскую диссертацию по теме «Электрооборудование для импульсного намагничивания и контроля постоянных магнитов и изделий на их основе». В настоящее время работает профессором кафедры электромеханики Чувашского государственного университета. Имеет 150 печатных трудов, 2 монографии, более 50 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Заслуженный работник высшей школы РФ, лауреат премии правительства Чувашской республики.

Приказчиков Александр Викторович

Родился в 1982 году. В 2007 году окончил Чувашский государственный университет по специальности «Электрические и электронные аппараты». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Моделирование клапанных электромагнитов и усовершенствование методик их проектного расчета». В настоящее время работает генеральным директором ООО «КБЭА». Имеет 33 научных публикации, 7 патентов.

Спиридонов Алексей Александрович

Родился в 1978 году. В 2001 году окончил Чувашский государственный университет по специальности «Системы автоматического управления электроприводами и промышленными роботами». Аспирант кафедры электромеханики Чувашского государственного университета.

Gusev Sergey

Was born in 1954. In 1983 he graduated from the Chuvash State University with specialization in «Electroheat machines». At present he works as principal design engineer at «КБЭА» JSC.

Nesterin Valery

Was born in 1941. In 1964 he graduated from Moscow Power Engineering Institute with specialization in «Electrical cars». He is a Doctor of Engineering, professor. In 1995 he defended a thesis in the subject «Electrical equipment for impulse excitation and control of permanent magnets and products on their bases». At present he works as professor of the electromechanic department of the Chuvash State University. He has 150 publications, 2 monographs, more than 50 author's certificates and invention patents. He is Honorary Figure of Russian Higher Education School, government award holder of the Chuvash republic.

Prikazshchikov Alexander

Was born in 1982. In 2007 he graduated from the Chuvash State University, the specialty is «Electric and electronic devices». He is candidate of technical sciences. In 2011 he defended the thesis, the subject of the thesis is «The simulation of the flap solenoid magnets and improvement of the method of its design calculation». At present, he works as General Director of «Design bureau of electrical equipment» Ltd. He has 33 academic papers, 7 patents.

Spiridonov Alexey

Was born in 1978. In 2001 he graduated from Chuvash State University, the specialty is «Automatic control systems of electric drives and industrial robots». At present, he is postgraduate student of the Electromechanics department of the Chuvash State University.

Расчет параметров электрического поля в земле с неоднородной электрической структурой при стекании тока с искусственного заземлителя

// Calculation of the parameters of the electric field in the ground with an inhomogeneous electrical structure at current runoff from artificial earthing //

**Косарев А.Б., д.т. н., профессор,
АО «ВНИИЖТ», г. Москва**

**Косарев Б.И., д.т. н., профессор,
МГУПС (МИИТ), г. Москва**

В статье предложена методика расчета параметров электрического поля в земле со сложной геоэлектрической структурой, обусловленных током, стекающим с искусственного заземлителя, состоящего из двух параллельно включенных протяженных металлических полос. При рассмотрении картины электрического поля в земле от тока, стекающего с искусственного заземлителя, принято, что искусственный заземлитель имеет длину, существенно превышающую расстояние от нее до точек земли, где определяется значение потенциала. Установлено, что распределение потенциалов в верхнем слое земли может быть рассчитано по формуле Зунде.

Предложена номограмма расчета эквивалентной проводимости среды от геоэлектрических параметров грунта в месте расположения искусственного заземлителя. Показано, что расчетное значение эквивалентной удельной электрической проводимости двухслойной модели земли находится между проводимостями первого и второго слоев земли и при расчетах с погрешностью, не превышающей нескольких процентов, может быть принята равной проводимости второго слоя. Далее в статье обоснован алгоритм определения переходного сопротивления «Искусственный заземлитель – земля» в зависимости от электрических параметров земли и продольного сопротивления металлических полос. Установлено, что переходное сопротивление «Искусственный заземлитель – земля» может быть определено из расчета трансцендентного уравнения, для решения которого предложена номограмма.

Ключевые слова: электрическое поле, заземлитель, система тягового электроснабжения, рельсовый путь, ток, напряжение.

The paper proposes a method of calculating the parameters of the electric field in the ground with a complex geoelectric structure caused by current flowing down from the artificial earth electrode consisting of two parallel metal bands of extended included. When considering the pattern of the electric field in the ground of the current flowing from the artificial grounding, it is assumed that an artificial earth electrode has a length substantially greater than the distance from it to the ground points where the value of the potential is determined. It was found that the distribution of the potentials in the upper layer of the earth can be calculated according to the formula of Sound.

A nomogram for calculating the equivalent conductivity of the medium from the geoelectric soil parameters in place of artificial earthing arrangement. It is shown that the calculated value of the two-layer earth model equivalent conductivity is between the conductivities of the first and second layers of the earth, and when paying with an error not exceeding a few percent, can be taken as the conductivity of the second layer. Later in the article the algorithm for determining the transition resistance «Artificial earthing – land», depending on the electrical parameters of the ground and the longitudinal resistance of the metal strips. It was found that the contact resistance «Artificial earthing – land» can be determined on the basis of the transcendental equation for solutions which proposed a nomogram.

Keywords: electric field, the earthing system of the traction power supply, track, current, voltage.

Согласно [1] опоры контактной сети либо индивидуально, либо посредством троса группового заземления соединяются с рельсовым путем. Сказанное объясняется необходимостью отключения токов короткого замыкания при нарушении изоляции контактной сети.

Использование рельсового пути в качестве естественного заземлителя позволяет с большой вероятностью исключить возникновение двух и трехфазных коротких замыканий при разряде токов молнии как в одну из фаз трехфазной воздушной линии напряжением свыше 1000 В при ее расположении на опорах контактной сети, так и при разряде токов молнии в контактную сеть.

Эти же требования к условиям заземления опор контактной сети предъявляются и к системе тягового электроснабжения 2 x 25 кВ с питающим проводом и автотрансформаторами.

В ряде публикаций обоснована возможность отказа от применения для заземления опор контактной сети рельсового пути с использованием для этой цели экранирующего провода (ЭП) [2, 3]. Однако система тягового электроснабжения с ЭП имеет ряд недостатков, а именно:

- отсутствуют технические решения по плавке гололеда на ЭП;
- нет токовых (дистанционных) защит, фиксирующих обрыв ЭП.

Устранить указанные выше недостатки возможно путем использования искусственного заземлителя (ИЗ) [4, 5], состоящего из двух расположенных в земле металлических полос.

В [5] оценена эффективность этого решения для грозозащиты и заземления опор контактной сети в системе тягового электроснабжения с высоковольтным питающим проводом, в частности, в системе, где на головной подстанции расположены силовые трансформаторы, обмотки которых соединены по усовершенствованной схеме Скотта [6].

Аналогичный вопрос целесообразности использования ИЗ для заземления опор контактной сети и металлических ограждений платформ и железнодорожных путей возникает и при электрификации скоростной магистрали Москва – Казань, где для электроснабжения тяговых потребителей принята система 2.25 кВ. Отказ от использования рельсового пути в качестве естественного заземлителя опор скоростной магистрали Москва – Казань является весьма перспективным решением в части повышения надежности работы рельсовых цепей и увеличения производительности труда при выполнении работ по текущему и капитальному ремонту пути.

Дополнительно укажем, что использование расположенных в земле металлических полос в качестве искусственных заземлителей позволяет обеспечить условия электробезопасности при обслуживании электроустановок и сетей протяженных эстакад при их сооружении над контактной сетью постоянного тока [7].

При расчете сопротивления растекания ИЗ принято, что его переходное сопротивление равно 1 Ом·км, что соответствует рекомендациям по расчету аналогичного параметра для металлических покровов силовых кабелей при их расположении в земле с однородными электрическими параметрами [8, 9].

В реальных условиях грунт в месте расположения искусственного заземлителя носит сложный геоэлектрический характер и для обычных грунтов носит двухслойный характер, а для вечномерзлых грунтов – трехслойный [2].

В таблице 1 приведены геоэлектрические параметры двухслойных грунтов (Европейской части России) и трехслойных – для зон со скалистыми и вечномерзлыми грунтами.

Обработка результатов экспериментальных данных о параметрах земли для Центрального района России позволила установить незначительную стохастическую связь между характеристиками грунтов. Так, дове-

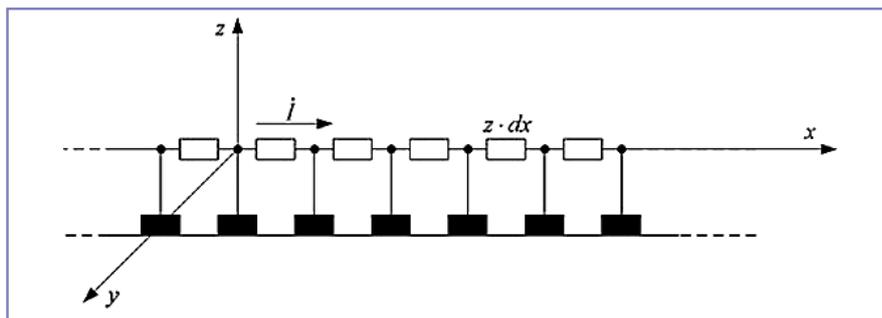


Рис. 1. Расчетная схема для определения параметров электрического поля в земле тока, стекающего в землю с однородными электрическими параметрами:
 x, y, z – система координат, z_n – полное сопротивление контура «Металлическая полоса – земля», I – ток, втекающий в металлическую полосу в начале координат.

рительный интервал коэффициента корреляции удельных электрических сопротивлений первого и второго слоев составляет $0,03 \leq \beta_{\rho_1 \rho_2} \leq 0,3$, для сопротивления и мощности первого слоя $0,11 \leq \beta_{\rho_1 h_1} \leq 0,35$. Корреляционная зависимость между сопротивлениями второго и мощностью первого слоев практически отсутствует, так как $0,06 \leq \beta_{\rho_2 h_1} \leq 0,2$.

При расчете электрического поля в земле токов, стекающих с искусственного заземлителя (ИЗ), примем, что две параллельно включенные металлические полосы находятся в первом слое.

Прежде чем перейти к решению рассматриваемой задачи, определим распределение потенциалов в земле с однородными электрическими параметрами, то есть с проводимостью g .

При рассмотрении картины электрического поля в однородной земле от тока, стекающего с искусственного заземлителя, примем ряд допущений.

В частности, считаем, что искусственный заземлитель имеет длину, существенно превышающую расстояние от нее до точек земли, где определяется значение потенциала. Далее представим металлическую полосу в виде бесконечно большого числа круглых пластин радиуса $\rho_0 = \frac{b}{2}$, где b – ширина полосы (в нашем случае $b = 40$ мм). Пусть расстояние между центрами пластин $\Delta x = b$, расстояние между металлически-

ми полосами равно $2d$, t – глубина нахождения заземлителя в земле.

На рис. 1 представлена расчетная схема для определения параметров электрического поля в земле тока, стекающего в землю с однородными электрическими параметрами.

Стеkanie тока происходит с металлической полосы в землю, распределение тока по длине металлической полосы носит экспоненциальный характер.

Рассмотрим картину поля, создаваемого током $I_{c\beta}$, стекающим с круглой пластины радиуса ρ_0 , лежащей на поверхности земли. При стекании тока $I_{c\beta}$ с такой пластины в безграничное однородное полупространство с проводимостью g электрическое поле в земле описывается выражением [10]

$$\varphi_\beta = \frac{I_{c\beta}}{2\pi\gamma\rho_0} \operatorname{arcsin} \frac{\rho_0}{u},$$

где u – одна из криволинейных ортогональных координат.

Пусть координата x направлена вдоль оси металлической полосы (рис. 1), y и z – ортогональные координаты. Распределение потенциала в земле описывается приведенным выше выражением лишь при стекании тока с одной пластины.

Электрическое поле тока, стекающего с бесконечно большого числа пластин, определяется суммированием потенциалов токов, стекающих с бесконечного числа круглых пластин:

Таблица 1. Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение логарифмически нормальных распределений геоэлектрических характеристик грунта.

Параметры грунтов	Район с обычными грунтами			Районы со скалистыми и вечномерзлыми грунтами				
	ρ_1	ρ_2	h_1	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2
	Ом·м	Ом·м	м	Ом·м	Ом·м	Ом·м	м	м
Математическое ожидание	130	90	4,0	420	7760	750	1,5	25,0
Среднеквадратическое отклонение	60	115	5,3	220	4750	860	0,65	9,3

$$\varphi = \sum_{\beta \rightarrow -\infty}^{\infty} \varphi_{\beta} = \frac{1}{2\pi\gamma\rho_0} \sum_{\beta \rightarrow -\infty}^{\infty} I_{c\beta} \operatorname{arcSin} \frac{\rho_0}{u_{0\beta}}. \quad (1)$$

Расстояние от оси металлической пластины до любой точки на поверхности земли значительно превышает радиус пластины. В этом случае можно положить, что

$$\operatorname{arcSin} \frac{\rho_0}{u_{0\beta}} = \frac{\rho_0}{\sqrt{y^2 + z^2 + (x - \beta \cdot \Delta x)^2}}.$$

С учетом последнего выражения формулу (1) для нахождения распределения потенциалов в земле можно записать следующим образом:

$$\varphi = \frac{1}{2\pi\gamma} \sum_{\beta \rightarrow -\infty}^{\infty} \frac{I_{c\beta}}{\sqrt{(x - \beta \Delta x)^2 + y^2 + z^2}}.$$

Тогда стекающий с b_0 пластины ток определяется из выражения

$$I_{c\beta} = \frac{I\gamma_n \Delta x}{2} e^{-\gamma|x_0 - \beta \Delta x|},$$

где γ_n – коэффициент распространения металлической полосы определяется по формуле

$$\gamma_n = \sqrt{\frac{z_n}{r_n}}.$$

Здесь r_n – переходное сопротивление 1 км «Искусственный заземлитель – земля», Ом/км; Z_n – полное сопротивление контура «Металлическая полоса – земля», Ом/км.

Тогда

$$\varphi = \frac{I\gamma_n}{4\pi\gamma} \sum_{\beta \rightarrow -\infty}^{\infty} \frac{e^{-\gamma|x_0 - \beta \Delta x|}}{\sqrt{y^2 + z^2 + (x - \beta \Delta x)^2}}.$$

Обозначив $\beta \Delta x = \xi_{\beta}$; $\Delta x = \Delta \xi$; $z^2 + y^2 = \rho^2$, получим

$$\varphi = \frac{I\gamma_n}{4\pi\gamma} \sum_{\beta \rightarrow -\infty}^{\infty} \frac{e^{-\gamma|x_0 - \xi_{\beta}|}}{\sqrt{(x - \xi_{\beta})^2 + \rho^2}}.$$

Сумма, входящая в полученное выражение, есть интегральная сумма. Так как $\Delta \xi$ достаточно мало, то сумму можно заменить интегралом. Погрешность, допускаемая при такой замене, невелика. С учетом сказанного

$$\varphi = \frac{I\gamma_n}{4\pi\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\gamma|x_0 - \xi|}}{\sqrt{(x - \xi)^2 + \rho^2}} d\xi.$$

Если положить $\xi = x - t$, то с учетом [2, 9]

$$\varphi = \frac{I\gamma_n}{4\pi\gamma} \tilde{\Omega}[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \rho], \quad (2)$$

где $\tilde{\Omega}[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \rho]$ – специальная функция двух переменных [9].

В реальных условиях две металлические полосы расположены на глуби-

не (t) в неоднородной земле. Тогда, используя метод зеркальных отображений [10], с учетом выражения (2), распределение потенциалов в первом слое земли для районов с двухслойной моделью рассчитывается по формуле

$$\varphi = \frac{I\gamma_n}{4\pi\gamma_1} \sum_{n=0}^{\infty} k^n \sum_{i=1}^4 \tilde{\Omega}_i[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \rho_i] \quad (3)$$

при

$$k = (\gamma_1 - \gamma_2) / (\gamma_1 + \gamma_2);$$

$$\tilde{\Omega}_{1,2}[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \rho_i] =$$

$$= \tilde{\Omega}[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \sqrt{y^2 \pm t + (2n+1)h^2 + z^2}];$$

$$\tilde{\Omega}_{3,4}[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \rho_i] =$$

$$= \tilde{\Omega}[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \sqrt{y^2 \pm t + (2n+1)h^2 + (z+2d)^2}].$$

Применительно к районам вечной мерзлоты (трехслойная модель земли) под коэффициентом k в формуле (3) следует подставлять коэффициент v , зависящий от геоэлектрической структуры земли [4].

В дальнейшем для упрощения расчетов примем, что земля имеет однородную структуру с эквивалентной удельной электрической проводимостью γ_3 . Тогда распределение потенциалов в верхнем слое земли имеет вид

$$\varphi(x, y, z) = \frac{I\gamma_n}{2\pi\gamma_3} \Omega[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \sqrt{(y-t)^2 + z^2}] \quad (4)$$

при

$$\gamma_3 = \gamma_1 \frac{\Omega[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \sqrt{(y-t)^2 + z^2}]}{\sum_{n=0}^{\infty} k^n \sum_{i=1}^4 \Omega_i[\gamma_n(x - x_0), \gamma_n \rho_i]}.$$

На рис. 2 приведены результаты расчета γ_3 от параметров геоэлектрической структуры земли (γ_1, γ_2 и h), а также от расстояния d .

Установлено, что с погрешностью, не превышающей нескольких процентов, γ_3 находится между γ_1 и γ_2 и стремится к γ_2 . Данный результат согласуется с выводами о величине γ_3 , полученными при расчете электрического поля в земле от тока, стекающего с рельсового пути [2, 5].

На рис. 3 приведена номограмма из параллельных шкал для расчета эквивалентного удельного электрического сопротивления в районах вечной мерзлоты. Ключ к пользованию номограммой приведен там же. Так, при $p_1 = 460$ Ом·м, $p_2 = 12500$ Ом·м, $p_3 = 600$ Ом·м, $h = 1,25$ м и $h_2 = 2,8$ м по номограмме (рис. 3) $p_3 = 3300$ Ом·м.

Учтем, что максимальное значение потенциала искусственного заземлителя относительно земли имеет место при $x_0 = 0$.

Отметим также, что использование формул (3, 4) для расчета электрического поля в земле осложнено из-за неопределенности параметра γ_n – коэффициента распространения искусственного заземлителя.

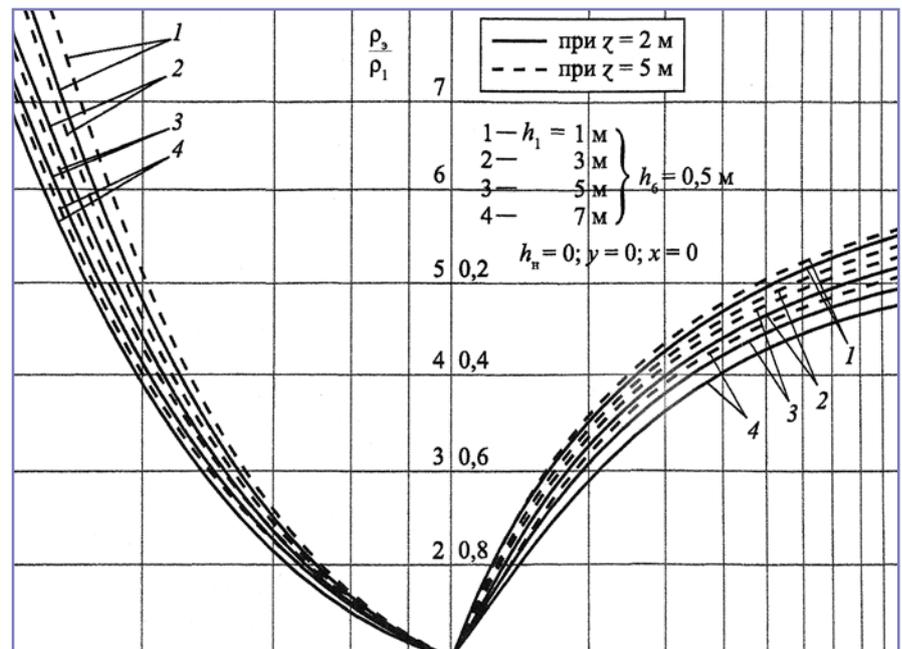


Рис. 2. Зависимость эквивалентной проводимости среды от геоэлектрических параметров грунта.

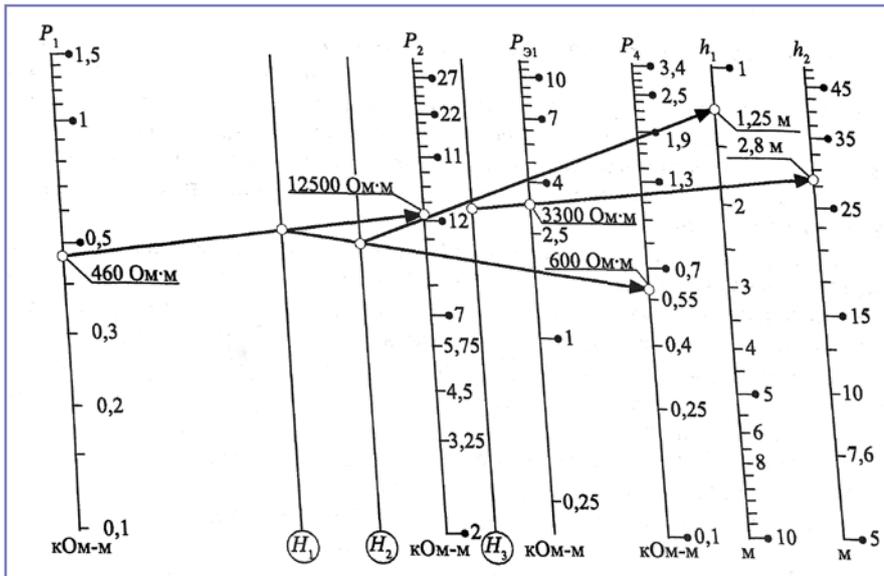


Рис. 3. Номограмма расчета эквивалентного удельного электрического сопротивления трехслойной модели земли.

Для инженерных расчетов специальная функция двух переменных $[\Omega(u; v)]$ может быть найдена по номограммам, приведенным в [2].

Вернемся к определению переходного сопротивления «Искусственный заземлитель – земля». С этой целью определим потенциал искусственного заземлителя относительно земли в начале координат. Учтем, что при

$$\beta = 0; \quad n = 0; \quad x_0 = 0,$$

$$\text{arcSin} \frac{\rho_0}{u_0} = \frac{\pi}{2} = 1 + \frac{\pi}{2} - 1;$$

$$\beta \neq 0; \quad n = 0; \quad x_0 = 0,$$

$$\rho_0 < \beta \cdot \Delta x,$$

$$\text{arcSin} \frac{\rho_0}{u_0} \approx \frac{\rho_0}{\sqrt{\rho_0^2 + \beta^2 \Delta x^2}}.$$

Тогда, с учетом вышеуказанных ограничений, потенциал металлической круглой пластины, с которой стекает максимальное значение тока (в точке $x = 0$), относительно удаленной земли равен

$$\begin{aligned} \varphi_n &= \frac{I\gamma_n}{2\pi\gamma_3} \left[\tilde{\Omega}(0; \gamma_n \rho_0) + \frac{\pi - 2}{4} \cdot \frac{\Delta x}{\rho_0} \right] = \\ &= \frac{I\gamma_n}{2\pi\gamma_3} [\tilde{\Omega}(0; \gamma_n \rho_0) + 0,57], \end{aligned} \quad (5)$$

так как $\Delta x = 2\rho_0$.

Учтем, что при коротком замыкании на искусственный заземлитель ее потенциал относительно удаленной земли равен

$$\varphi_n = \frac{I}{2} \sqrt{z_n r_n}. \quad (6)$$

Приравняв правые части выражений (5) и (6), запишем

$$\frac{I}{2} \sqrt{z_n r_n} = \frac{I\gamma_n}{2\pi\gamma_3} [\tilde{\Omega}(0; \gamma_n \rho_0) + 0,57].$$

Учитывая, что $\gamma_n = \sqrt{\frac{z_n}{r_n}}$, получим

$$\frac{\pi z_n}{\gamma_n^2 \rho_0} = \tilde{\Omega}(0; \gamma_n \rho_0) + 0,57 \text{ при } \rho_3 = \frac{1}{\gamma_3}.$$

Рассмотрим подробнее свойство функции $\tilde{\Omega}(0; \gamma_n \rho_0)$. Примем, что $\gamma_n = |\gamma_n| e^{i\varphi}$. Учтем также, что переходное сопротивление «Искусственный заземлитель – земля» слабо зависит от продольного сопротивления полосы и частоты переменного тока. Тогда переходное сопротивление целесообразно рассчитывать для тока с частотой $\omega = 0$.

В этом случае $\tilde{\Omega}(0; \gamma_n \rho_0) \approx \Omega(0; |\gamma_n| \rho_0)$, и функция $\Omega(0; |\gamma_n| \rho_0)$ является положительной при всех конечных значениях аргументов и имеет конечное значение. Функция $\Omega(0; |\gamma_n| \rho_0)$ имеет единственный максимум и определяется из соотношения

$$\Omega(0; |\gamma_n| \rho_0) = \frac{\pi}{2} [S_0(\gamma_n \rho_0) - Y_0(\gamma_n \rho_0)],$$

где S_0 и Y_0 – функции Струве и Неймана [11].

При $\gamma_n \rho_0 \ll 1$

$$\Omega(0; |\gamma_n| \rho_0) = K_0(\gamma_n \rho_0) \approx -\ln \frac{\gamma_n \rho_0}{2},$$

где $K_0(\gamma_n \rho_0)$ – функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка;

$\gamma_n = \sqrt{\frac{z_n}{r_n}}$ – коэффициент распространения тока в металлических полосах;

$z_n = R_n$ – продольное сопротивление ИЗ постоянному току, Ом/км.

Тогда переходное сопротивление «Искусственный заземлитель – земля» может быть определено из расчета трансцендентного уравнения вида

$$\frac{\theta}{\gamma_n^2} = -\ln \frac{\gamma_n \rho_0}{2} + 0,57$$

$$\frac{\theta}{\alpha_n^2} = \delta - \ln \alpha_n,$$

при $\alpha_n = \gamma_n$; $\theta = \frac{\pi R_n}{\rho_3}$; $\delta = \ln \frac{2}{\rho_0} + 0,57$,

где $\rho_0 = \frac{b_0}{2} = \frac{4}{2} 10^{-5} \text{ км} = 2,00 \cdot 10^{-5} \text{ км}$.

Окончательно трансцендентное уравнение для нахождения переходного сопротивления «Искусственный заземлитель – земля» имеет вид

$$\frac{\theta}{\alpha^2} = \delta - \ln \alpha \quad (7)$$

при $\theta = \frac{\pi R_n}{\rho}$; $\delta = 12,0$.

Для нахождения параметра a из трансцендентного выражения (7) может быть использована номограмма, предложенная в [9]. Переходное сопротивление «Искусственный заземлитель – земля» рассчитывается по формуле

$$r_n = \frac{R_n}{\alpha^2}.$$

Для инженерных расчетов переходного сопротивления «Искусственный заземлитель – земля» проанализируем выражение (7). Натуральный логарифм от коэффициента распространения металлической полосы, расположенной в земле, существенно меньше параметра $\delta = 12,0$.

В этой связи можно предположить, что $\frac{\theta}{\alpha^2} \approx \delta$; $\frac{\pi R_n}{\alpha^2 \cdot \rho} = \delta$; $\alpha^2 = \frac{R_n}{r_n}$,

откуда

$$r_n = \frac{\delta \cdot \rho_3}{\pi} \approx 4,4 \rho_3 [\text{Ом} \cdot \text{км}].$$

Так, при $\rho_3 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ переходное сопротивление «Искусственный заземлитель – земля» получается равным 0,44 Ом·км.

При известных значениях напряжения «Искусственный заземлитель – земля» и значениях потенциала земли на расстоянии шага от искусственного заземлителя шины ($l_u \approx 0,8 \text{ м}$) коэффициент прикосновения рассчитывается по формуле

$$\alpha_{np} = 1 - \frac{\varphi(0; \gamma_n l_u)}{0,5l \sqrt{z_n \cdot r_n}}. \quad (8)$$

Анализ расчетов, выполненных согласно выражению (8), указывает на относительно слабую зависимость этого коэффициента от геоэлектрической структуры

грунта. В этой связи отклонение этого коэффициента от среднего значения незначительно, и при расчетах его значение может быть принято равным 0,9.

Искусственный заземлитель, расположенный в земле, представляет собой линию с распределенными параметрами ($Z_n; r_n$) и длиной l . В общем случае пусть l_1 – расстояние от начала ИЗ до места втекания тока.

Тогда входное сопротивление «Искусственный заземлитель – земля» может быть рассчитано согласно выражению

$$Z_{ex} = \sqrt{Z_n \cdot r_n} \frac{cth \gamma_n l_1 \cdot cth \gamma_n (l - l_1)}{cth \gamma_n l_1 + cth \gamma_n (l - l_1)} =$$

$$= \sqrt{Z_n \cdot r_n} \frac{1}{th \sqrt{\frac{Z_n}{r_n} l_1} + th \sqrt{\frac{Z_n}{r_n} (l - l_1)}}.$$

При втекании тока в середине ИЗ, то есть при $l_1 = 0,5 l$, получаем

$$Z_{ex} = \frac{0,5 \sqrt{Z_n \cdot r_n}}{th \sqrt{\frac{Z_n}{r_n} \cdot 0,5 l}}$$

и при втекании тока в начале искусственного заземлителя

$$Z_{ex} = \sqrt{Z_n \cdot r_n} \cdot Cth \sqrt{\frac{Z_n}{r_n} l}.$$

Для простоты расчетов с погрешностью, не превышающей нескольких процентов, можно принять $Z_n = |Z_n|$, то есть полное сопротивление полосы считать по модулю.

Выводы

1. Предложена методика расчета параметров электрического поля в земле со сложной геоэлектрической структурой, обусловленных током, стекающим с искусственного заземлителя, состоящего из двух параллельно включенных металлических полос.

2. Обоснован алгоритм определения переходного сопротивления «Искусственный заземлитель – земля» в зависимости от электрических параметров земли и продольного сопротивления металлических полос. Предложена номограмма расчета эквивалентной проводимости среды от геоэлектрических параметров грунта в месте расположения искусственного заземлителя.

Литература

1. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. М.: Транспорт. – 1997. – 68 с.
2. Косарев А. Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. – М.: ИНТЕКСТ. – 2008. – 480 с.
3. Конча А. А., Косарев А.Б. Система тягового электроснабжения с экранирующим проводом и отсоединенными от рельсов опорами контактной сети. – М.: Электричество, 1997. № 2. – с. 19–25.
4. Косарев А. Б., Косарев Б.И. Электромагнитная совместимость устройств электропитания систем железнодорожной автоматики с тяговыми сетями. М.: ВИНТИ. Транспорт. Наука, техника, управление. № 7, 2004. С. 31–34.
5. Косарев А. Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. – М.: ООО ВМГ-Принт – 2015. – 348 с.
6. Асанов Т.К., Косарев Б.И., Караев Р.И., Петухова С.Ю. Система тягового электроснабжения участков переменного тока. Авторское свидетельство SU № 1689143 А1-М.: – Патент. 07.11.91. Бюлл. № 4. – 3 с.
7. Косарев И.А. Использование статистического анализа сбалансированного плана для определения факторов, влияющих на безопасность труда при сооружении протяженных эстакад над контактной сетью. – М.: ВИНТИ. Транспорт. Наука, техника, управление. – 2014. – № 1. – с. 67–71.
8. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт. 1965. – 464 с.
9. Михайлов М.И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия. М.: Связьиздат, 1959. – 583 с.
10. Шимони К. Теоретические основы электротехники. М.: Мир, 1964. 685 с.
11. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, – 1964. – 772 с.

Косарев Александр Борисович

Родился в 1964 году. В 1986 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение магистральных железных дорог». Доктор технических наук, профессор. В 1999 году защитил диссертацию по теме «Методы и средства обеспечения экологической безопасности в зонах электромагнитного влияния электрифицированных железных дорог переменного тока». В настоящее время работает заместителем генерального директора АО «ВНИИЖТ». Автор более 100 публикаций и 15 авторских свидетельств и патентов.

Косарев Борис Иванович

Родился в 1940 году. В 1962 году окончил МИИТ по специальности «Теплоэнергетические установки электростанций». Доктор технических наук, профессор. В 1979 году защитил диссертацию по теме «Электрификация железных дорог». В настоящее время работает профессором кафедры «Электроэнергетика транспорта» МГУПС (МИИТ). Автор более 300 научных трудов, имеет свыше 125 авторских свидетельств и патентов. Заслуженный деятель науки России.

Kosarev Alexander

Was born in 1964. In 1986 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with specialization in «Electrical supply of main railway lines». He is a Doctor of Engineering, professor. In 1999 he defended a thesis in the subject «Methods and means of environmental security in electromagnetic interference zones of AC electrified railroads». At present he works as deputy general manager of JSC «VNIIZhT». He has more than 100 publications, 15 author's certificates and patents

Kosarev Boris

Was born in 1940. In 1962 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a degree in «Heat and power machines of electrical power plants». In 1979 he defended the thesis on the topic «Railways electrification». At the present time he works as a professor of «Electric power of transport» department of MSURE (MIIT). He is the author of 300 publications, more than 125 copyright certificates and patents. He is an honored academic figure of Russia.

Математическая модель переходной зоны слаботочных электрических контактов в условиях запыленности

// Mathematical model of low-current electric contact transition area under dusty conditions //

Люминарская Е.С., к.т.н.,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Дианов В.Н., д.т.н., профессор,
Московский государственный машиностроительный университет
«МАМИ», г. Москва

В статье предложена методика определения характеристик переходной зоны запыленных слаботочных электрических контактов, основанная на комплексной методике взаимодействия шероховатых поверхностей. Получена зависимость вероятности сбоя от запыленности электрических контактов. Ключевые слова: электрический контакт, переходная зона, переходное сопротивление, переходная индуктивность, переходная электроемкость.

Одним из способов повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры является предупреждение сбоев и отказов в ее работе. Часто сбой происходит из-за неисправности электрических контактов. Для разработки эффективных методов обнаружения источников возможных сбоев в слаботочных электрических контактах необходимо создавать математические модели, позволяющие определять характеристики переходной зоны в реальных условиях работы.

В статье предложена математическая модель определения сопротивления, индуктивности и электроемкости переходной зоны запыленных электрических контактов, основанная на комплексной методике расчета механического взаимодействия контактных поверхностей.

Переходная зона электрических контактов обычно представляется в виде контакта шероховатых поверхностей, которые взаимодействуют отдельными микровыступами [1–2]. Предлагаемая математическая модель, в отличие от имеющихся моделей, учитывает:

- возможность упругой, упругопластической и пластической деформаций отдельных выступов контактных по-

This article offers a method intended to determine characteristics of the transition area of dusty low-current electrical contacts basing on complex technique of rough surface interaction. The article reveals dependence of failure probability on dustiness of electrical contacts.

Keywords: electrical contact, transition area, transition resistance, transition electric capacity.

верхностей в зависимости от нагрузки на них;

- упругую деформацию основания, на котором располагаются сферические выступы, моделирующие шероховатые поверхности;
- изменение характеристик выступов при повторной нагрузке из-за пластических деформаций отдельных выступов;
- возможность попадания пыли на контактные поверхности.

При расчете шероховатые поверхности заменяются эквивалентными поверхностями, которые представляют собой набор сферических сегментов, расположенных случайным образом на упругих основаниях. Для упрощения расчетов предполагается, что выступы двух поверхностей расположены друг напротив друга. Высота микровыступов считается случайной величиной, а радиусы всех выступов одинаковые. Высоты и радиус микровыступов выбираются в зависимости от шероховатости контактных поверхностей [3].

При расчете все выступы разделяются на три группы. К первой группе относятся взаимодействующие между

собой выступы, ко второй – не взаимодействующие выступы. К третьей группе относятся выступы, между которыми расположены частицы пыли.

Сила взаимодействия, радиус пятна контакта и среднее контактное давление определяются через сближение взаимодействующих микровыступов, которое зависит от сближения поверхностей вершин, высоты микровыступов и их перемещения как жестких тел на упругом основании. Если сближение двух выступов меньше

$$6.7 \frac{\sigma_T \cdot r}{E_p^2},$$

то указанные выше величины определяются по формулам Герца, в противном случае – по формулам, предложенным для упругопластической и развитой пластической деформаций сферических выступов в работе [1].

После снятия нагрузки при первой коммутации упругие деформации исчезают, а пластические остаются. При этом изменяются высоты и радиусы микровыступов. Как показали расчетные исследования, эти изменения необходимо учитывать при определении характеристик переходной зоны. Путем расчетных исследований методом конечных элементов получены приближенные формулы для определения остаточных значений высот и радиусов микровыступов.

Экспериментальные исследования различных авторов показали, что на контактных поверхностях всегда имеются частицы пыли, которые обычно имеют неправильную форму. Для удобства расчетов частицы пыли неправильной формы заменяются эквивалентными шарами, диаметр которых определяется по формуле

$$d = \sqrt{L \cdot B}, \quad (1)$$

где L , B – два наименьших размера во взаимно перпендикулярных направлениях.

Диаметр частиц пыли считается случайной величиной, имеющей закон распределения Рэлея.

В математической модели предполагается, что взаимодействие двух выступов с частицей пыли носит упругий характер. Силы взаимодействия в этом случае определяются по формуле Герца. Если при взаимодействии растягивающие напряжения в центре пылинки окажутся больше предела прочности материала пылинки, то пылинка разрушается и не влияет на расчет.

Расчет выполняется следующим образом. На первом этапе моделируются шероховатые поверхности набором сферических сегментов и определяются диаметры частиц пыли, которые случайным образом располагаются на контактных поверхностях. На втором этапе расчета задается сближение контактных поверхностей, через которое определяются сближения микронеровностей, силы взаимодействия и радиусы пятен контактов отдельных выступов. Перемещения микровыступов как жестких целых на упругом основании зависят от сил их взаимодействия. Поэтому расчет выполняется итерационным способом. На первой итерации деформация упругих оснований не учитывается.

Важнейшей характеристикой переходной зоны электрических контактов является переходное сопротивление. Сопротивление переходной зоны представляется в виде параллельного соединения сопротивлений отдельных микровыступов.

Поверхности микровыступов покрыты пленками (оксидными, сульфидными и др.). Если среднее контактное давление двух микровыступов больше предела прочности пленки, то сопротивление контактирующих микровыступов обуславливается только стягиванием линий тока к площадке пятна контакта [1, 2] и определяется по формуле

$$R_{pi} = \gamma \cdot (\rho_1 + \rho_2) / (4 \cdot r_{ai}), \quad (2)$$

где ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления материалов контактов; r_{ai} – радиус пятна контакта двух выступов.

Сопротивление двух выступов с частично разрушенными пленками превышает их сопротивление без поверхностных пленок, при расчете это учитывается коэффициентом γ [1].

Если под действием контактной силы поверхностные пленки не разрушены, то сопротивление контактирую-

щих выступов складывается из сопротивления стягивания и поверхностного сопротивления пленок и определяется по формуле

$$R_{pi} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4 \cdot r_{ai}} + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\pi \cdot r_{ai}^2}, \quad (3)$$

где σ_1, σ_2 – удельные сопротивления поверхностных пленок.

При определении индуктивности переходной зоны электрических контактов используются следующие допущения:

- все одноточечные контакты равномерно распределены по площади соприкосновения, имеющей форму окружности;
- ток в проводниках течет не по всему проводнику, а по цилиндрическим каналам с одинаковыми радиусами R ; количество указанных каналов равно количеству одноточечных контактов n , и они наилучшим способом упакованы в цилиндрический проводник радиусом R_w ;
- плотность тока во всех цилиндрических проводниках радиусом R_w одинаковая.

Под переходной зоной электрического контакта понимают части контактирующих проводников, в которых изменяются направления линий тока из-за их стягивания к пятнам контакта. Проведенные расчетные исследования по формулам, приведенным в [4], позволили путем аппроксимации получить следующие зависимости для вычисления индуктивности переходной зоны одноточечного контакта и взаимной индуктивности переходных зон двух одноточечных контактов:

$$L_1 = 0.15 \mu_0 \cdot R \cdot \left(3.17 - \frac{r}{R} \right),$$

$$M_{ij} = 0.315 \mu_0 R^2 / d_{ij}, \quad (4)$$

где R – радиусы цилиндрического канала, по которому течет ток; r – радиус пятна контакта; d_{ij} – расстояние между одноточечными контактами; μ_0 – магнитная постоянная.

Индуктивность многоточечного контакта складывается из индуктивностей одноточечных контактов и взаимных индуктивностей одноточечных контактов:

$$L_n = \frac{1}{n^2} \cdot \left[\sum_{k=1}^n L_{1k} + \sum_{k=1}^n \left(\sum_{m=1, m \neq k}^n M_{k,m} \right) \right], \quad (5)$$

где n – количество одноточечных контактов.

С использованием формул (4) и (5) получена зависимость для определения

дополнительной индуктивности многоточечного контакта:

$$L_{np} = L_n - L^* = \frac{0.15 \mu_0 \cdot R}{n} \left(1 - \frac{r_c}{R} \right), \quad (6)$$

где L_n – индуктивность переходной зоны многоточечного контакта, то есть участков контактируемых проводников, на которых изменяются направления линий тока; L^* – индуктивность тех же участков, если считать, что два проводника представляют собой единое целое и линии тока остаются прямолинейными; r_c – средний радиус пятен контакта микровыступов.

Как видно из представленной формулы, дополнительная индуктивность переходной зоны n -точечного контакта не зависит от взаимной индуктивности одноточечных контактов.

Появление переходной емкости электрических контактов, с одной стороны, обусловлено наличием воздушных промежутков между контактными поверхностями, а с другой стороны – образованием локальных емкостей между взаимодействующими микровыступами.

Все локальные емкости имеют параллельное соединение. Следовательно, переходная емкость вычисляется путем сложения локальных емкостей:

$$C_p = C_B + \sum_{i=1}^{n_1} C_i^* + \sum_{i=1}^{n_2} C_i^p, \quad (7)$$

где C_B – суммарная емкость воздушных промежутков на номинальной площади контакта; C_i^* – локальная емкость двух взаимодействующих выступов с неразрушенной пленкой; C_i^p – локальная емкость двух взаимодействующих выступов с частично разрушенной пленкой.

Емкость воздушных промежутков определяется по формуле [3]

$$C_B = \epsilon \epsilon_0 \int_{A_n} \frac{dA}{\delta}, \quad (8)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного промежутка; δ – функция зазора между контактными поверхностями; dA – элементарная площадь одной из поверхностей; A_n – номинальная площадь контакта.

Емкость двух взаимодействующих выступов с неразрушенными пленками можно вычислять по формуле, используемой для плоского конденсатора с двухслойным диэлектриком

$$C_i^* = \varepsilon_0 \frac{S_{ai}}{h_1/\varepsilon_1 + h_2/\varepsilon_2}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительные диэлектрические проницаемости поверхностных пленок; h_1, h_2 – толщины поверхностных пленок; S_{ai} – площадь пятна контакта двух взаимодействующих выступов.

Емкость двух взаимодействующих выступов с частично не разрушенными пленками можно вычислять также по формуле (9), введя поправочный коэффициент, учитывающий на пятне контакта соотношение площадей, проводящих и не проводящих ток.

По предложенной методике была получена зависимость вероятности сбоя P от концентрации частиц пыли на контактных поверхностях ν_c (количества частиц пыли на 1 мм² контактной поверхности). Сбой фиксировался по величине переходного сопротивления. Если переходное сопротивление превышало номинальное значение в два и более раз, то условно фиксировался сбой. Расчеты выполнялись методом статистических испытаний. Результаты расчета приведены на рис. 1.

Рассмотренные в данной работе вопросы влияния запыленности в электрических контактах представляют, на наш взгляд, несомненный интерес для специалистов в области ЭМС, в частности, исследующих целостность электрических сигналов и влияние на нее индуктивности, емкости и омического сопротивления. Полученные резуль-

таты также могут быть использованы в вопросах безопасности аппаратуры, в частности, при контроле и диагностике сбоев в задачах ЭМС.

Выводы

1. Предложена методика определения переходного сопротивления, учитывающая возможную запыленность контактных поверхностей и образование пленок (оксидных, сульфидных и др.) на поверхностях контактов.

2. При концентрации частиц пыли до 20 частиц на мм² вероятность сбоя может достигать 15%.

3. Предложена методика определения индуктивности многоточечного контакта.

4. Показано, что дополнительная индуктивность многоточечного контакта не зависит от взаимной индуктивности одноточечных контактов.

5. Рассмотрена методика определения емкости переходной зоны многоточечного контакта.

Литература

1. Измайлов В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. – Тверь: ТГТУ, 2010. – 112 с.
2. Holm R. Electrical Contact. – New York: Springer, 1979.
3. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
4. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп., 1986. – 488 с.

Люминарская Екатерина Станиславовна

Родилась в 1988 году. В 2010 году окончила ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет» по специальности «Автоматизация технических процессов и производств в машиностроении». Кандидат технических наук. В 2015 году защитила

диссертацию на тему «Математические модели сбоев контактных систем». В настоящее время работает в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре электротехники и промышленной электроники. Является автором 16 научных работ, 6 патентов на полезную модель.

Дианов Вячеслав Николаевич

Родился в 1940 году. В 1964 году окончил Рязанский радиотехнический институт по специальности «Инженер-электрик по автоматике и телемеханике». Доктор технических наук, профессор. В 2002 году защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и средства обнаружения и регистрации источников сбоев в системах и устройствах с кодоимпульсной модуляцией сигналов». В настоящее время профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах» Московского государственного машиностроительного университета «МАМИ». Автор 265 научных трудов, 4 монографий, 5 учебных пособий, 51 патента РФ.

Lyuminarskaya Ekaterina

Was born in 1988. In 2010 she graduated from Moscow State University of Mechanical Engineering, the specialty is «Automation of technological processes and production in mechanical engineering». She is candidate of technical sciences. In 2015 she defended the thesis, the subject of the thesis is «Mathematical models of contact systems failures». At present, she works in Moscow Technical State University, at the department of electrical engineering and industrial electronics. She has 16 academic papers, 6 patents for utility model.

Dianov Vyacheslav

Was born 1940. In 1964 he graduated from Rязan Radioengineering University, the specialty is «Engineer-electrician for automation and teleautomatic». He is candidate of technical sciences, professor. In 2002 he defended the thesis, the subject of thesis is «Methods and means for the detection and recording of the of failure sources in the systems and devices with code-impulse modulated signals». At present he is professor of the «Automation and control in technical systems» department of the Moscow State University of Mechanical Engineering. He is author of the 265 academic papers, 4 monographs, 5 study guides, 51 Russian Federation patents.

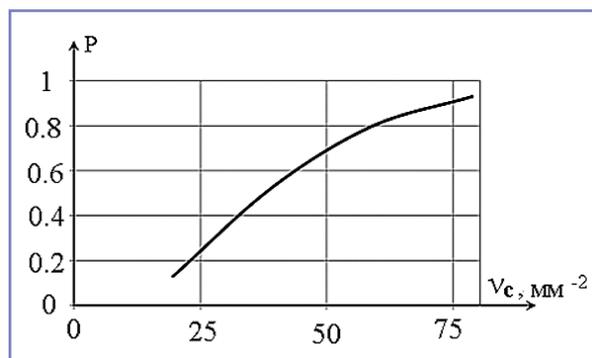


Рис. 1. Зависимость вероятности сбоя от концентрации частиц пыли на контактных поверхностях.

Использование водорода в автомобильном транспорте

// Hydrogen use in the car transport //

**Овсянников Е.М., д.т.н., профессор,
Клюкин П.Н., к.т.н., доцент,
Гайтова Т.Б., д.т.н., профессор,
Университет машиностроения (МАМИ), г. Москва**

В статье рассмотрены способы получения, хранения и использования водородного топлива в автомобильном транспорте. Предложен новый способ производства водорода на борту автомобиля с использованием энергии выхлопного газа.

Ключевые слова: водородное топливо, электролизер, энергоноситель, альтернативная энергия, электроводородный генератор.

В связи с истощением традиционных ресурсов для производства электроэнергии и мировым кризисом в последние годы в мире все больше внимания уделяется возобновляемым источникам энергии. При этом учитывается проблема экологической чистоты производства электроэнергии.

Одним из препятствий использования электроэнергии на транспорте является невозможность ее хранения в больших количествах (таблица 1).

Из этих данных следует, что при выработке и распределении электричества только 28% от содержащейся в природных ресурсах энергии поступает потребителю, а при использовании, например, газа – 93%.

Ведутся исследования и предлагается хранить получаемую от автономных источников электроэнергию или в гидроаккумуляторах, или в виде вырабатываемого из воды электролизом

The methods of producing, storage and using the hydrogen fuel are considered. The new way of producing hydrogen on board with exhaust energy using is suggested. Keywords: hydrogen fuel, electrolyzer, energy resource, alternative energy, electro hydrogen generator (EHG).

водорода [1]. Использование водорода как энергоносителя позволяет решить энергетические проблемы в тесной связи с экологическими. Кислород, получаемый при разложении воды, может использоваться не только как окислитель в энергетике, но и для удаления отходов жизнедеятельности. Особенностью водорода по сравнению с традиционным ископаемым топливом является то, что при огромных запасах на Земле водород существует преимущественно в связанном виде, и его получение требует затрат энергии. Это накладывает ограничения на возможности применения водорода в энергетике и на транспорте.

Весьма привлекательно для решения этой проблемы выглядит использование водорода в виде топлива для автомобилей, работающих на водороде, или в качестве добавки к топливу. Это становится особенно актуальным, учитывая, что более 30% энергии при рабо-

те теплового двигателя выбрасывается в атмосферу с выхлопными газами.

Эта идея привлекает исследователей уже в течение многих лет. Однако до сих пор многие вопросы остаются нерешенными. Наиболее важные из них – создание инфраструктуры для заправки автомобилей и производство самого водорода. Дело в том, что затраты энергии для производства водорода сопоставимы с энергией, получаемой от произведенного водорода. Наряду с исследованиями компаний Honda, General Motors, Toyota, Ford, BMW, Daimler, Hyundai, Nissan, Volkswagen по созданию водородных автомобилей, многие компании ведут разработки заправочных комплексов, в том числе и с использованием альтернативной энергии: солнечной, энергии ветра. Такие исследования ведутся и в России.

Обычно стоимость производства топлива в долларах относят к ГДж выделяемой тепловой энергии. Производство водорода электролизом воды на основе современных технологий оценивается по затратам от 10 до 20 \$/ГДж. Аналогичные цифры дают оценки, полученные для термохимического производства водорода из воды с использованием энергии высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР). В ближайшей перспективе водород, получаемый из воды в процессе паровой конверсии метана с помощью энергии ВТГР, может производиться в стране при затратах ниже 7 \$/ГДж, что эквивалентно стоимости бензина – 0.24 \$/л. В настоящее время наиболее рентабельный способ производства водорода – паровая конверсия.

Самая низкая стоимость получения водорода из природного газа – 6–12 \$/ГДж [2], самая высокая при электролизе воды – 40 \$/ГДж. При этом стоимость природного газа сегодня составляет 2.9 \$/ГДж, бензина – 5.25 \$/ГДж. В среднем затраты электроэнергии при электролизе воды составляют 5–10 кВт·ч/м³ H₂.

Таблица 1. Сравнение КПД энергоснабжения потребителя при сопоставлении электроэнергии и газа как теплоносителей.

Источник энергии	КПД термический производства энергии	КПД термический транспортирования и распределения энергии	КПД энергоснабжения потребителя
Электроэнергия	0.325	0.86	0.28
Газ	0.97	0.96	0.93



Рис. 1.1



Рис. 1.2

JCNEWS.RU

Рис. 1. Водородная автозаправочная станция.

Помимо затрат энергии на получение водорода, необходимо учитывать расходы на его хранение и транспортировку.

Если производство водорода из общих расходов составляет 29.2%, то сжижение водорода – 48%, хранение жидкого водорода – 10%, а доставка водорода трубопроводом на 1800 км – 6% [2]. Стоимость жидкого водорода в 1.5–2.5 раза выше стоимости газообразного водорода.

Преимущества хранения, транспортировки к потребителю и экологическая чистота работающих энергоустановок и двигателей подталкивают конструкторов к более широкому применению водорода. Проблемой является высокая стоимость получения водорода. Перспективно использовать для этой цели энергию возобновляемых источников.

Известен многолетний опыт Германии: в 1990 году там было принято решение о проведении исследований перспективной солнечной водородной энергоустановки в городе Нойнбурге. Электроэнергия в количестве 39000 кВт·ч/год вырабатывается с помощью солнечных батарей, а затем используется для производства водорода из воды с помощью электролизеров [3].

Водород хранится в жидком и газообразном видах и используется для питания автомобилей различного типа.

Испытаны различные типы электролизеров и систем хранения водорода. Проведены испытания автомобилей на жидком и газообразном водороде. Проведенные в Германии исследования различных электроводородных установок, средств хранения и использования водорода в течение 13 лет вызвали большой интерес. За это время исследовательский центр в городе Нойнбурге посетили

130000 человек из 100 стран. Накоплен большой опыт эксплуатации и модернизации испытанных установок – от систем фотоэлектрического получения электроэнергии до автомобилей, потребляющих полученный водород.

С 1997 года в университете прикладных наук в Германии успешно прошла испытания весьма перспективная энергоустановка, состоящая из ветряной установки мощностью 5 кВт, электрогенератора, щелочного электролизера и баллонов для хранения получаемого водорода [4]. Получаемый водород сжимается до 2.5 МПа и хранится в баллонах. Баллон емкостью 2.0 м³ заполняется за 50 часов (эффективность электролизера 5·50·2·25 = 5 кВт·ч/м³ H₂). Достоинством такой установки является возможность хранения получаемого водорода с малыми потерями энергии.

У специалистов фирм Германии имеется большой опыт использования ветряных установок для производства электроэнергии. Известен даже факт, что в ветреную погоду ветряные станции приходится останавливать из-за перепроизводства электроэнергии. Предлагается хранить вырабатываемую ветряными станциями энергию с помощью водорода, который получается из воды после ее электролиза [5, 6].

В работе [7] для получения водорода из воды предложен электроводо-

родный генератор с магнитным ускорителем ионов во вращающемся электролите ЭВГМ. Для разложения воды (вместо электростатического поля в электролизерах) предлагается использовать центробежное и магнитное поля. Таким образом, вместо дорогой электроэнергии используются более дешевая кинетическая энергия вращающегося электролита и магнитное поле, в которое помещен вращающийся электролит.

Корпус вместе с электролитом вращается со скоростью 3000–9000 об/мин.

Магнитная индукция величиной около 1 Тесла наводится в электролите по-

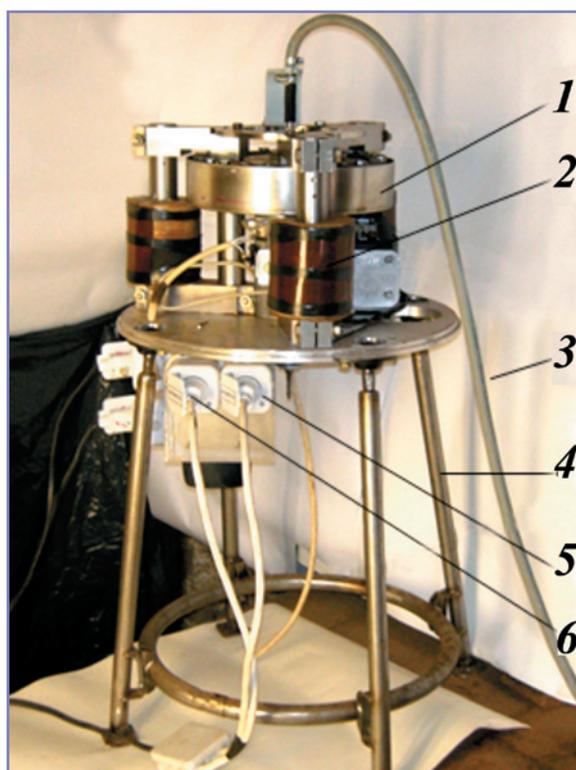


Рис. 2. Электроводородный генератор с магнитом ЭВГМ: 1 – ротор, 2 – соленоид, 3 – шланг для отвода газа, 4 – рама, 5 – питание электродвигателя, 6 – питание электромагнита.

стоянным магнитом (или электромагнитом, как показано на рис. 2). Вращение корпуса ЭВГМ обеспечивается электромотором. Эффективность работы ЭВГМ оценивается как $\eta_{\text{ЭВГМ}} = 0.5$.

Излишнюю электроэнергию хранят в АБ, откуда ее позднее можно забрать с потерями не менее 30%. Общая эффективность получения электроэнергии с помощью ветряной установки ($\eta_e = \eta_r \eta_6 \eta_k = 0.51$) складывается из эффективности генератора $\eta_r = 0.8$, эффективности системы хранения энергии в АБ $\eta_6 = 0.7$ и эффективности преобразования постоянного тока от АБ в переменный с помощью конвертора $\eta_k = 0.9$. Общая эффективность получения водорода в электролизере с КПД около $\eta_3 = 0.4$ снижается до $\eta_{\text{H}_2} = \eta_3 \cdot \eta_e = 0.4 \cdot 0.51 = 0.2$.

Замена генератора и электролизера на ЭВГМ позволит увеличить эффективность получения водорода до $\eta_{\text{H}_2} = \eta_{\text{ЭВГМ}} \eta_p = 0.5 \cdot 0.9 = 0.45$ ($\eta_p = 0.9$ – КПД повышающего редуктора) и оставит возможность получения в случае необходимости требуемого количества электроэнергии с помощью топливного элемента. Однако топливные элементы пока обладают рядом серьезных недостатков. Прежде всего, имеют высокую стоимость (около 3500 \$/кВт) и короткий срок службы (около 5 лет).

Поставщиком энергии может служить энергия отработавших газов автомобиля. Использование энергии отработавших газов для разложения воды в электроводородном генераторе с постоянными магнитами позволяет существенно удешевить процесс получения водорода в автономных условиях. Авторы в настоящий момент занимаются исследованиями и разработкой реальных образцов электроводородных генераторов для грузового транспорта.

Литература

1. Дорош И.А. Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг». Самые мощные проекты возобновляемой энергетики. Аналитический обзор АК 1–2012, итоги-2011, 2012.
2. Справочник. Водород, свойства, получение, хранение, транспортирование, применение.

Под ред. Гамбурга Д.Ю., Дубовкина Н.Ф. М.: «Химия», 1989, 672 с.

3. The Solar Hydrogen Project of Neunburg vorm Wald, German, <http://www.solar-hydrogen.com>. 1996–2011.

4. Jochen Lehmann, Thomas Luschinetz and Frank Menz. The wind – hydrogen-fuel cell chain. The hydrogen Planet, June 9–13, 2002, 14th World Hydrogen Energy Conference, Canada.

5. Germany Invests in Hydrogen Technology for Renewable Storage, Vehicles, 2012.

6. The Demonstration project RH₂-Werder/Kessin/Altentreptow (RH₂-WKA), 2012.

7. Овсянников Е.М., Долбилин Е.В., Кошляев Е.М. Электрооборудование автотранспортных средств с тяговыми электроприводами. «Палеотип», Москва, 2010, 363 с.

Овсянников Евгений Михайлович

Родился в 1948 году. В 1974 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Электропривод». Доктор технических наук, профессор. В 2003 году защитил докторскую диссертацию по теме «Электроприводы гелиоустановок наземного и космического базирования. Теория и практика». Опыт работы – 41 год. В настоящее время работает профессором кафедры «Электротехника» Университета машиностроения «МАМИ». Имеет более 90 научных и методических трудов, 16 авторских свидетельств и патентов на изобретение, 6 монографий и учебников.

Клюкин Павел Николаевич

Родился в 1981 году. В 2003 году окончил МГТУ «МАМИ» по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Кандидат технических наук. В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Стержневые катушки микропроцессорных систем управления бензиновым двигателем». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время – доцент кафедры АТЭ Университета машиностроения «МАМИ», директор по развитию ООО «Инжиниринговый центр «СМАРТ». Имеет более 20 публикаций, в том числе методические пособия с грифом УМО.

Гайтова Тамара Борисовна

Родилась в 1964 году. В 1986 году окончила КубГТУ по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий городов и сельских хозяйств». Доктор технических наук,

профессор. В 2006 году защитила диссертацию по теме «Развитие теории и практики электротехнических комплексов для нетрадиционной энергетики». Опыт работы – 25 лет. В настоящее время работает заведующей кафедрой «Электротехника» Университета машиностроения «МАМИ». Имеет более 100 научных трудов, 26 авторских свидетельств и патентов на изобретение, 2 монографии.

Ovsyannikov Evgeniy

Was born in 1948. In 1974 he graduated from Moscow Power Institute, specialization is «Electric drive». Doctor of Engineering, professor. In 2003 he defended Doctorate thesis, the theme is «Land-based and space-based solar station electric drivers. Theory and practice». Job experience is 41 years. At present he works as professor of «Electrical engineering» of Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI). The author of more than 90 scientific and methodological works, 16 author's certificates and invention patents, 6 monographs and textbooks.

Klyukin Pavel

Was born in 1981. In 2003 he graduated from MGTU «MAMI» with specialization in «Automobile and tractor electrical equipment». He is a candidate of Engineering Sciences. In 2006 he defended a Candidate thesis in the subject «Rod coils of petrol engine microprocessor control systems». His work experience is 11 years. At present he is associate professor of ATE department of Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), development director of the «Engineering center «SMART» LLC. He has more than 20 publications, including methodological guides with UMO stamp.

Gaitova Tamara

Was born in 1964. In 1986 she graduated from Kuban State Technological University with specialization in «Industrial power supply of cities and agriculture». She is a Doctor of Engineering, professor. In 2006 she defended a thesis in the subject «Theory and practice development of electrotechnical complexes for unconventional energy». Her work experience is 25 years. At present she works as chair holder of the department «Electric engineering» of Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI). She has more than 100 publications, 26 author's certificates and invention patents, 2 monographs.

Автоматические быстродействующие выключатели для городского электротранспорта

// High-speed circuit breakers for urban electric transport //

**Мурадов Э.Ш.,
ООО «Технос», г. Екатеринбург**

**Грицук А.А., к.т.н.,
Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург**

*Быстродействующая защита объектов городского электрического транспорта – инновационное решение начала XXI века: ускорение срабатывания, коммутация малых индуктивных токов, IT-управление. В статье приведены полные данные технических параметров и характеристик коммутационных аппаратов для управления и быстродействующей защиты электроустановок трамваев, троллейбусов, вагонов метро и преобразовательных подстанций разработки ООО «Технос». **Ключевые слова:** автоматический быстродействующий выключатель, городской электротранспорт, малые индуктивные токи.*

Быстродействующая защита, соответствующая требованиям ГОСТа [1], на отечественных подвижных объектах городского электротранспорта (ГЭТ) не применялась вплоть до конца XX века. Самым распространенным защитным аппаратом был относительно дешевый и с хорошими массогабаритными показателями выключатель АВ-8А производства ЗАО «Динамо-Плюс», г. Москва [2], который устанавливался в большинстве троллейбусов типа ЗИУ. Аппарат имеет ручное управление, и поэтому в качестве места его установки может использоваться только внутреннее пространство кабины водителя троллейбуса, что приводит к появлению в этой зоне кабелей высокого напряжения и опасности термического поражения водителя при неотключении выключателем тока питающей сети. В аппарате используется двухступенчатая щелевая дугогасительная камера без пламегасителя, конструкция которой не позволяет локализовать дугу внутри аппарата. Даже при отно-

High-speed protection of objects of urban electric transport – innovative solutions beginning of the XXI century: the acceleration operation, switching of small inductive currents, IT management. Are given full details of technical parameters and characteristics of switching devices for control and protection of high-speed electric trams, trolley buses, subway cars and converter stations developed by «Technos» LLC.

Keywords: high-speed circuit breaker, urban electric transport, small inductive currents.

сительно небольших токах короткого замыкания (КЗ) наблюдается выхлоп ионизированных газов, сопровождаемый значительными шумовыми и световыми эффектами, а при значительных токах КЗ (вблизи тяговой подстанции может достигать 16 кА) происходит выход дуги за пределы камеры. Аппарат не является быстродействующим, поскольку время его срабатывания на отключение заметно превышает 8 мс [2].

В конце прошлого века большинство парков ТТУ были укомплектованы трамвайными вагонами чешского производства «Татра-3» и «Татра-3М», в которых защиту обеспечивает линейный контактор SL-11 номинального тока 250 А в сочетании с реле максимального тока. Контактор, заблокированный с реле максимального тока, отключается лишь за 50–70 мс.

В вагонах метрополитена устанавливался быстродействующий выключатель БВ 630, для которого отключение малых индуктивных токов (МИТ) оста-

ется проблемным местом. В тяговых подстанциях (ТП) ТТУ и метрополитена быстродействующую защиту обеспечивают аппараты типа ВАБ и ВАТ производства «Уралэлектротяжмаш», а ныне «Энергомаш», г. Екатеринбург.

Одной из важных задач при создании нового подвижного объекта ГЭТ является его оснащение новой коммутационной и защитной аппаратурой, которая позволяет обеспечивать все рабочие режимы электропривода и быстро отключать при необходимости все токи, потребляемые электротранспортом от питающей сети (номинальные токи, токи перегрузки и КЗ, токи утечки, токи вспомогательного оборудования). Применение такой аппаратуры должно обеспечить выполнение двух важнейших требований, предъявляемых к подвижным объектам ГЭТ, а именно электро- и пожаробезопасность, которые должны повышать конкурентоспособность ГЭТ перед другими видами городского транспорта.

Замена выключателя АВ-8А разработанным в ООО «Технос» автоматическим быстродействующим выключателем ВБ 3/2–400/6 отключающей способности более 16 кА [3, 4] решила вопрос обеспечения быстродействующей защиты, однако проблема отключения МИТ сохранилась.

В последнее время все более острыми становятся вопросы безопасности обслуживающего персонала и пассажиров при токах утечки на корпус и землю, особенно в троллейбусах. АБВ постоянного тока с дистанционным управлением является необходимым защитным коммутационным аппаратом для электрических цепей, и он должен обеспечивать возможность отключения таких токов за время, безопасное для здоровья человека. Например, ГОСТ 12.1.038–82 «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновений и токов» регламентирует, что полное время от-

ключения защитной аппаратурой токов любых значений не должно превышать 80 мс. Использование рекуперативного торможения предъявляет требования к неполяризованности выключателя, так как возникновение значительных обратных токов – реальность. Кроме того, отсутствие заземления корпуса делает особенно острой проблему отключения токов утечки и прикосновения, представляющих опасность для пассажиров и обслуживающего персонала [5].

Токи утечки и прикосновений составляют лишь часть общего рабочего тока и оказываются в диапазоне так называемых «малых токов» или МИТ, для которых в традиционных типах аппаратов имеют место критические условия гашения дуги с затягиванием продолжительности или даже отказом в гашении. Исключение критических токов – основное требование к коммутационному аппарату по условиям электро- и пожаробезопасности. Это серьезная проблема, поскольку не каждый аппарат способен справиться с МИТ. Как показали исследования [2, 4], один из самых эффективных методов уменьшения времени горения дуги при критических токах – магнитное дутье. Критические токи электрических аппаратов сопутствуют появлению понятия критической коммутационной способности аппарата – это небольшое число включений и отключений при токе коммутируемой цепи, равном критическому току аппарата [6].

Для АБВ, в которых интенсивность воздействия на электрическую дугу определяется энергией отключаемого тока (деионное и последовательное магнитное гашение), время гашения дуги обратно пропорционально величине коммутируемого тока. Если приемлемую величину времени горения дуги по термическим и динамическим воздействиям на конструкцию принимать по предельной величине этих токов, то с уменьшением величины тока время дуги непрерывно возрастает вплоть до отказа в гашении при МИТ. На дугогасящие факторы, определяемые отключаемым током, всегда накладываются воздействия контактного узла противоположной направленности, обусловленные величиной хода подвижного контакта и его скоростью. В результате токовременная характеристика (ТВХ) гашения дуги в АБВ принимает характерную форму с максимумом t_d при некоторой небольшой величине

тока (кривая 1) или даже разомкнутую форму с зоной неотключаемых МИТ (кривая 2) [2]. Выбор формы этой зависимости для конкретного типа аппарата задается конструктивными решениями контактного узла и дугогасительной системы, которые должны удовлетворять требованиям гашения дуги в малом объеме за небольшое время.

Для аппаратов общепромышленного назначения типичной формой ТВХ дуги получается кривая 1 со значительным увеличением времени отключения, при некоторой малой величине тока, которую принято называть критическим током $I_{кр}$ [2, 6]. Параметры такого критического режима по величине тока $I_{кр}$ и предельной длительности горения дуги t_d – проблема нормирования требований к коммутационным аппаратам. В действующих в настоящее время нормативных документах нет единого соответствующих параметров. Применительно к АБВ, в том числе к аппаратам ГЭТ, такие нормы задаются в [1]. Здесь вместо термина критического тока вводится понятие наименьшего отключаемого тока выключателя $I_{мо}$ как минимального значения тока, который в состоянии отключить выключатель без недопустимого затягивания дуги на контактах. В зависимости от класса по быстрдействию величина $I_{мо}$ нормируется значениями 60 А, 15 А и 2,0 А для I–III классов соответственно. В то же время при любом токе большей величины полное время отключения не должно превышать 0,080 с по требованиям ГОСТа 12.1.038–82.

Таким образом, к критериям критических этими нормами относятся все отключаемые токи по величине меньше $I_{мо}$ без нормирования времени допустимого затягивания отключения сверх 80 мс, то есть допускается выпуск аппаратов, непригодных для отключения МИТ. В то же время [6] на тяговые электрические аппараты для работы на подвижном составе расширяет зону допустимой усложненной коммутации по

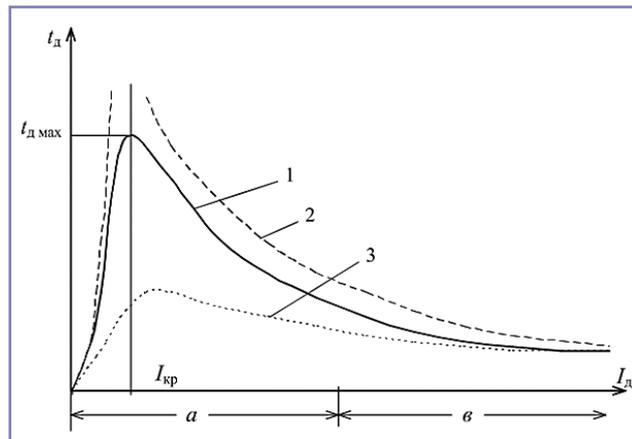


Рис. 1. Токовременная характеристика дугогашения:
а – зона малых и номинальных токов;
в – зона аварийных токов.

сравнению с предыдущими и нормирует ее параметры. К категории критических здесь относят любые отключаемые токи, не превышающие 10% от номинальной величины тока выключателя ($0,1 I_{ном}$) с ограничением в 50 А. Одновременно нормируется допустимая длительность горения дуги в усложненных условиях величиной до 0,5 с [6]. Следовательно, если при коммутации выключателем некоторых величин МИТ горение электрической дуги затягивается сверх 0,5 с, то его нельзя считать соответствующим нормам [1]. Однако это не означает, что такие аппараты непригодны к эксплуатации в схемах электрооборудования. Если ограничиться основным назначением аппарата как защитного устройства от токов недопустимой перегрузки и КЗ с управлением от схем защиты, а оперативные коммутации допускать лишь при номинальном токе в токоведущей системе аппарата, то время отключения будет соответствовать требованиям более высоких норм – ГОСТ 12.1.038–82. Но оперативные коммутации в управлении транспортным средством неизбежны, и использование АБВ для редких оперативных отключений вполне оправдано. При этом не исключается возможность формирования команды на отключение и при таких параметрах электрической цепи, когда возможно недопустимое затягивание горения дуги с опасностью отказа в отключении [2, 4, 7].

Уместно отметить, что в проекте совершенно нового документа – национального стандарта Российской Федерации [8] – эта проблема трактуется в пункте 6.5: «Наименьший отключаемый ток для выключателей максимального тока

должен быть не более 100 А при постоянной времени цепи 0,01 с». А в цепи с индуктивностью 15 мГн, где максимальное значение аварийного тока может достигать 10000 А, полное время отключения выключателя нормируется до 0,08 с. В то же время в этом документе рекомендации или требования к отключению токов в диапазоне 100–10000 А отсутствуют. К тому же допускается неотключение аппаратами токов ниже 100 А.

Нужно отметить, что неотключение каких-либо токов АБВ может привести к тяжелым аварийным последствиям. Горение дуги в течение 500 мс также может привести к термическому разрушению некоторых изоляционных деталей конструкции аппарата, в том числе вывести из строя защитные щетки дугогасительной камеры. Кроме того, длительное горение дуги даже до 500 мс способно разрушить контактную поверхность контактов путем эрозии, что может привести при благоприятных факторах к свариванию контактов [2, 7].

По мнению авторов этой статьи, можно считать совершенными, соответствующими современным требованиям защиты, только те электрические аппараты, которые отключают все токи от нуля до предельного значения прямого и обратного направлений их протекания. Для АБВ полное время отключения не должно превышать 80 мс при любой величине коммутируемого тока (кривая 3, рис. 1), то есть понятие критического тока теряет смысл. В этом случае можно говорить о коммутации АБВ без критического тока. Только конструктивными мерами без изменения системы

воздействия на дугу этого добиться не представляется возможным. Очевидно, для решения проблемы МИТ необходимо дополнительное воздействие на электрическую дугу посторонних источников энергии, независимых от величины коммутируемого тока [4].

В электротехническом предприятии ООО «Технос» разработан ряд АБВ постоянного тока для защиты тягового электрооборудования подвижных объектов ГЭТ, в частности, цепей якорей и возбуждения тяговых электродвигателей от токов КЗ и недопустимой токовой перегрузки. Кроме того, разработаны и сильноточные коммутационные аппараты для защиты тяговых подстанций от разрушительных действий аварийных токов. Данные электрические аппараты обеспечивают быстродействующую защиту, соответствующую нормативным документам.

Автоматический быстродействующий выключатель ВБ 7/2М-250/6

Этот аппарат (рис. 2) двухполюсный, устанавливается на крышах троллейбусов [4]. Внедренное в этом выключателе комбинированное магнитное дутье обеспечивает полное время отключения любого тока в любом направлении его протекания не более чем 80 мс, что соответствует требованиям ГОСТа 12.1.038–82.

Остальные технические характеристики:

- номинальный ток – 250 А; номинальное напряжение – 550 В;
- собственное время отключения – не более 6 мс;

- отключающая способность – более 16 кА (в безындуктивной цепи);
- исключены неотключаемые и критические токи;
- диапазон изменения напряжения главной цепи – 400–720 В.

Следует отметить, что построение быстродействующей защиты оборудования на контакторах как основных коммутирующих устройствах не представляется возможным [2], хотя некоторые фирмы в настоящее время, добавляя электронные блоки, пытаются безуспешно решить эту проблему.

Автоматические быстродействующие выключатели типа ВБ 11/1-XXX/6

Технические характеристики выключателей (рис. 3):

- номинальный ток – 250, 400 А;
- номинальное напряжение – 550 В;
- собственное время отключения – не более 5 мс;
- отключающая способность – более 16 кА (в безындуктивной цепи);
- исключены неотключаемые токи;
- диапазон изменения напряжения цепей управления – 16,8–30 В.

Величина критического тока прямого направления, то есть тока, совпадающего по направлению с ранее коммутируемым током КЗ, составляет 0,8–14,9 А, а величина критического тока обратного направления, то есть тока противоположного направления по отношению к ранее коммутируемому току КЗ, составляет 3,9–25 А. Полное время отключения цепи с критическим током – не более 250 мс.

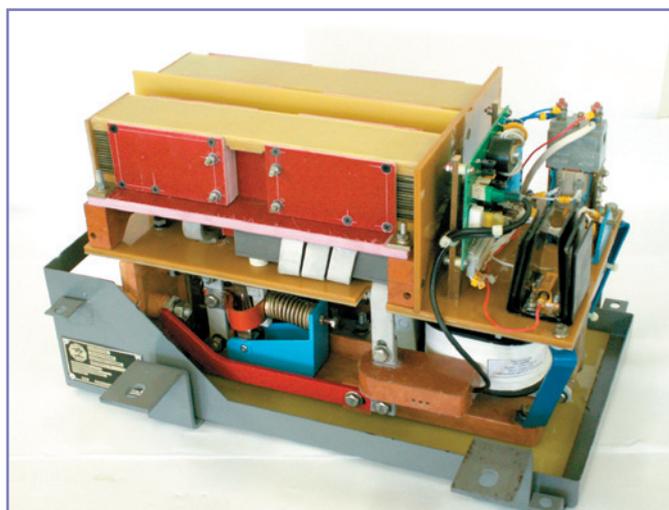


Рис. 2. Выключатель ВБ 7/2М-250/6 без кожуха.



Рис. 3. Выключатель ВБ 11/1-250/6 без кожуха.



Рис. 4. Выключатель ВВ 10/1–630/8.



Рис. 5. Выключатель ВВ 10/1–630/8 со стороны установки датчиков тока.

**Автоматический
быстродействующий
выключатель
ВВ 10/1–630/8**

Этот аппарат (рис. 4, 5) предназначен для защиты тягового электрооборудования вагонов метрополитена от токов КЗ и недопустимой токовой перегрузки. Масса выключателя не превышает 70 кг.

Технические характеристики выключателя:

- номинальный ток – 630 А; номинальное напряжение – 750 В;
- собственное время отключения – 2 мс;
- отключающая способность – более 35 кА (в безындуктивной цепи);
- полное время отключения цепи с критическим током – не более 340 мс (в обратном направлении протекания тока – около 20,3 А);
- исключены неотключаемые токи;

• диапазон изменения напряжения цепей управления – 45–83 В.

Выключатель устанавливается под вагоном, значит, отключение МИТ является первоочередной задачей. Надо отметить, что данный аппарат с этой задачей справляется успешно. Этому способствуют некоторые решения: подвиж-

ный контакт выполняется с хвостиком (рис. 6), что удлиняет зону перехода дуги от контакта на дугогасительный рог; при отключении подвижный контакт относительно неподвижного контакта поднимается на несколько мм (около 10 мм), тем самым удлиняя длину дуги, что способствует движению вверх опор-

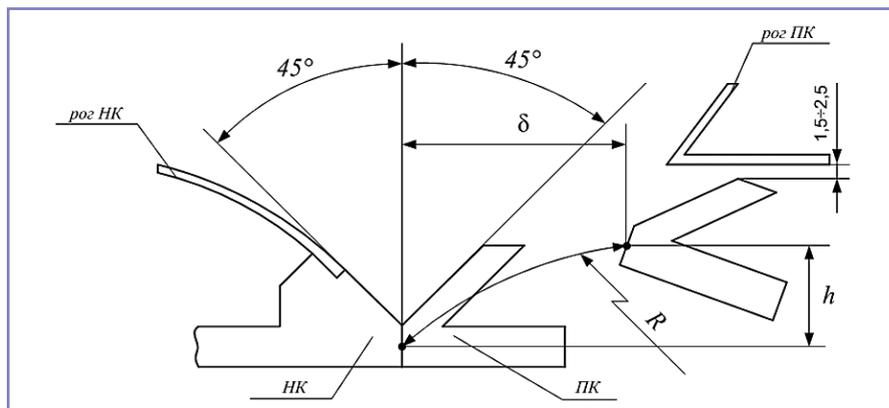


Рис. 8. Контактная система ВВ 10/1–630/8.



Рис. 6. Контакты выключателя во включенном положении.



Рис. 7. Контакты выключателя в отключенном положении.

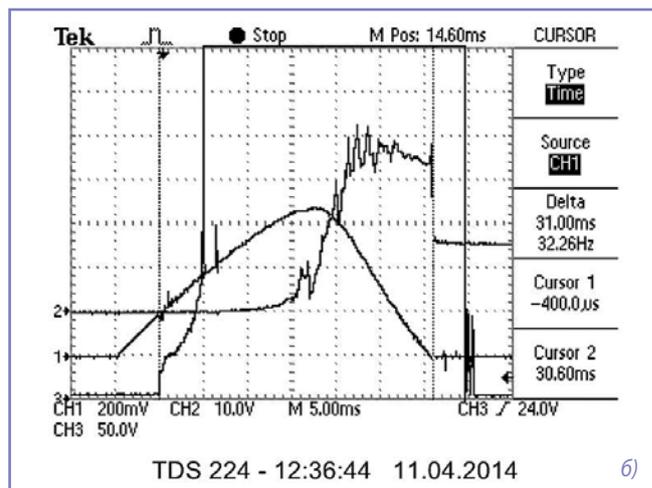
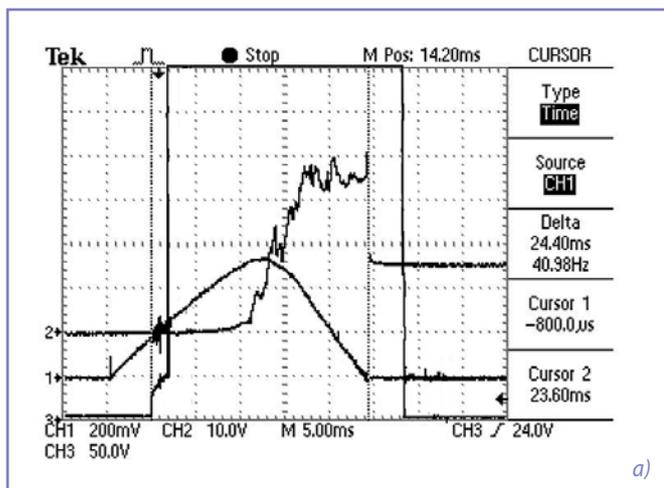


Рис. 9. Осциллограммы отключения МИТ:

а) ток – 54,1 А, индуктивность – 4,5 мГн, напряжение – 800 В; б) ток – 5,2 А, индуктивность – 4,5 мГн, напряжение – 800 В.

ных точек дуги (рис. 7). На рис. 8 приведена конструкция контактного узла выключателя. Результаты экспериментов доказали, что именно такая форма контактов лучше способствует движению опорных точек дуги, и при этом контактные поверхности меньше изнашиваются. Экспериментально установлено, что наилучший переход дуги с силовых контактов на дугогасительные рога происходит, когда расстояние между ними составляет 1,5–2,5 мм.

По результатам исследования гашения выключателем МИТ прямого и обратного направлений протекания тока видно, что неотключаемых токов аппарат не имеет. Максимальное значение полного времени выключателя составляет 332 мс (при обратном направлении протекания тока величиной 20,3 А) при индуктивности цепи 4,5 мГн. Некоторые осциллограммы приведены на рис. 9. При исследованиях конструкции дуго-

гасительной камеры были испытаны различные дугостойкие материалы, где хорошие результаты показали «Delmat 68.420» и «Дюростон».

Для регистрации превышения тока в первичной цепи тока более установленного в первичную цепь тока установлены три датчика тока.

Автоматический быстродействующий выключатель БВ 24/1–2000/10Л

Технические характеристики:

- номинальный ток – 2000 А;
- номинальное напряжение – 1050 В;
- напряжение цепей управления – 110 В, 220 В;
- собственное время отключения – 4 мс;
- отключающая способность – более 70 кА (в безындуктивной цепи);
- ток уставки – 1000–4000 А;

- исключены неотключаемые токи;
- полное время отключения цепи с критическим током – не более 120 мс.

Уменьшение времени гашения дуги МИТ достигается благодаря сдвинутым магнитопроводам в системе дугогашения [9] (рис. 10).

В режиме длительной эксплуатации удержание привода во включенном состоянии выполняет постоянный магнит.

Автоматический быстродействующий выключатель БВ 23/1–5000/10Л

Технические характеристики выключателя:

- номинальный ток – 4000 А, 5000 А;
- номинальное напряжение – 1050 В;
- напряжение цепей управления – 110 В, 220 В;
- собственное время отключения – до 5 мс;

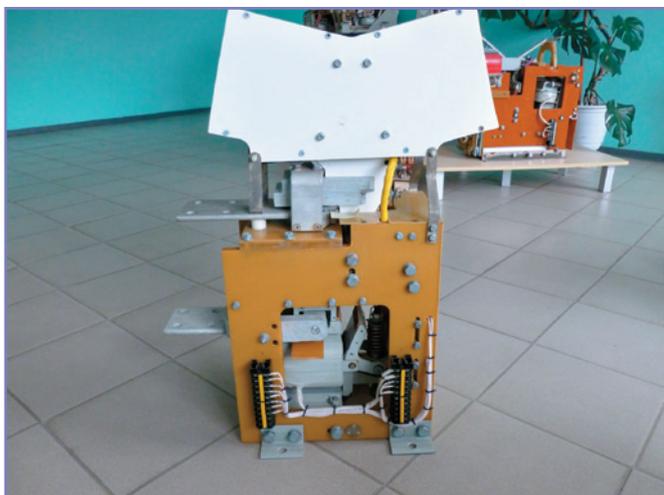


Рис. 10. Выключатель БВ 24/1–2000/10Л.



Рис. 11. Выключатель БВ 23/1–5000/10Л.

- отключающая способность – более 90 кА (в безындуктивной цепи);
- исключены неотключаемые токи;
- полное время отключения цепи с критическим током – не более 210 мс;
- ток уставки – 2000–8000 А.

В этом аппарате применен оригинальный способ диагностики избыточного хода контактов, что позволяет избежать сваривания контактов при недопустимых значениях изношенности силовых контактов [10] (рис. 11).

В заключение следует добавить, что более 2000 троллейбусов укомплектованы выключателем ВБ 7, более 600 трамваев оснащены выключателями типа ВБ 11. Выключатель ВБ 10 находится в Екатеринбургском метрополитене для прохождения эксплуатационных испытаний, а выключатель ВБ 24 успешно прошел эти испытания самыми тяжелыми условиями в фидере Екатеринбургского ТТУ. Выключатель ВБ 23/1–4000/10Л эксплуатируется на Челябинском трубопрокатном заводе, а выключатель ВБ 23/1–5000/10Л прошел испытания в Московском метрополитене, притом ничем не уступая зарубежным аналогам. Уместно отметить, что АБВ фирмы ООО «Технос» в некоторых аспектах превосходят импортные электрические аппараты того же назначения.

Литература

1. ГОСТ 2585–88. Выключатели автоматические быстродействующие постоянного тока. Общие технические требования. – Взамен ГОСТ 2585–81; введ. 1988–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 29 с.
2. Мурадов, Э.Ш. Быстродействующие выключатели ООО «Технос». Ч. 1 / Э.Ш. Мурадов. – Екатеринбург: Полиграфист, 2008. – 222 с.: ил.
3. Мурадов, Э.Ш. Двухполюсный автоматический быстродействующий выключатель ВБ 3/2 / Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2008. – № 1. – С. 24–27.

4. Мурадов, Э.Ш. Быстродействующие выключатели ООО «Технос». Ч. 2 / Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук. – Екатеринбург: Сред. – Урал. кн. изд-во, 2008. – 264 с.: ил.

5. Мурадов, Э.Ш. Ток утечки как косвенный показатель электробезопасности троллейбуса / Э.Ш. Мурадов, А.А. Грицук // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2008. – № 5. – С. 24–27.

6. ГОСТ 9219–95. Аппараты электрические тяговые. Общие технические требования. – Взамен ГОСТ 9219–88; введ. 1995–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 33 с.

7. Мурадов, Э.Ш. Быстродействующий автоматический выключатель для повышения электробезопасности городского электротранспорта / Э.Ш. Мурадов // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 48–52.

8. ГОСТ Р. Выключатели постоянного тока на напряжение свыше 1000 В для тяговых подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. Общие технические условия (Проект 201X). – М.: Стандартиформ, 2014. – 24 с.

9. Устройство магнитного дутья: пат. на изобретение № 2396628 Рос. Федерация: RU 2396628 С1 Н 01 Н 9/44 / Э.Ш. Мурадов // заявитель и патентообладатель – Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2008145353; заявл. 17.11.2008; опубл. 10.08.2010, бюлл. № 22. – 4 с.: ил.

10. Способ диагностики провала контактов коммутационного аппарата: пат. на изобретение № 2361310 Рос. Федерация: RU 2361310 Н 01 Н 11/04 / Э.Ш. Мурадов // заявитель и патентообладатель – Общество с ограниченной ответственностью «Технос». – № 2008110230; заявл. 17.04.2008; опубл. 10.07.2009, бюлл. № 19. – 5 с.: ил.

Мурадов Эльхан Шахбаба оглы

Родился в 1955 году. В 1987 году окончил Азербайджанский институт нефти и химии по специальности «Технология электрохимического производства». Опыт работы – 27 лет. В настоящее время работает заместителем

генерального директора по научно-исследовательской работе ООО «Технос» (г. Екатеринбург). Заслуженный изобретатель РФ. Является автором 6 монографий, 7 статей ВАК, 98 патентов на изобретения, 107 патентов на полезные модели, 2 патентов на промышленные образцы.

Грицук Александр Антонович

Родился в 1929 году. В 1954 году окончил Уральский политехнический институт по специальности «Техника высоких напряжений». Кандидат технических наук, доцент. В 1970 году защитил диссертацию по теме «Защита от коммутационных перенапряжений». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Техника высоких напряжений» УрФУ, г. Екатеринбург. Является автором 3 монографий, 20 авторских свидетельств, 20 учебно-методических разработок.

Muradov Elhan Shakhbaba ogly

Was born in 1955. In 1987 he graduated from Azerbaijan Institute of Petroleum and Chemistry with a degree «Electrochemical production technology». He has 27 years of work experience. At the present time he works as the General Director Deputy of research scientific work in «Technos» Ltd. (Ekaterinburg city). Honored inventor of RF. He is the author of 6 monographs, 7 Higher Attestation Commission's articles, 98 invention patents, 107 patents on utility models, 2 patents on production prototypes.

Gritsuk Alexander

Was born in 1929. In 1954 he graduated from Ural Polytechnic Institute with degree in «High voltage equipment». He is candidate of technical sciences, associate professor. In 1970 he defended the thesis, the theme of thesis is «Switching surges protection». He has 50 years of work experience. At the present he is associate professor of High voltage equipment department of the Ural State University (Ekaterinburg city). He is an author of 3 monographs, 20 certificates of authorship and 20 training resources.

Влияние тяговых и тормозных характеристик коллекторного и асинхронного приводов на энергетическую эффективность электровозов переменного тока

// Influence of hauling and brake descriptions of collector and asynchronous drive on power efficiency of electric locomotives of alternating current //

**Власьевский С.В., д.т.н., профессор,
Малышева О.А., к.т.н., доцент,
ФГБОУ «ДВГУПС», г. Хабаровск**

**Мельниченко О.В., к.т.н., доцент,
ФГБОУ «ИрГУПС», г. Иркутск**

**Грибенюк Д.В.,
Депо «Хабаровск-2» Дальневосточной железной дороги,
г. Хабаровск**

В статье рассмотрены свойства тяговых характеристик и характеристик мощности электровозов переменного тока с коллекторным и асинхронным приводами в режимах тяги и рекуперативного торможения. Дана сравнительная оценка их свойств. Показаны пути влияния тяговых характеристик на расход электроэнергии в режиме тяги и тормозных характеристик на возврат электроэнергии в сеть при рекуперативном торможении электровоза. Проведен сравнительный анализ влияния тяговых и тормозных характеристик на энергетическую эффективность электровозов переменного тока с коллекторным и асинхронным приводами.

Ключевые слова: электровоз, электрический привод, тяговые и тормозные характеристики, характеристики мощности, расход и возврат электроэнергии.

In the article properties of hauling descriptions and descriptions of power of electric locomotives of alternating current are considered with a collector and asynchronous drive in the modes of traction and recuperative braking. The comparative estimation of their properties is given. Ways of influence of traction characteristics on an electric power expense in the mode of draft and brake characteristics on return of the electric power to a network at recuperative braking of an electric locomotive are shown. The comparative analysis of influence of traction and brake characteristics on power efficiency of electric locomotives variable with collector and asynchronous drives is carried out.

Keywords: electric, electric drive, traction and braking performance, the characteristics of the power consumption and the power return.

На сети железных дорог России эксплуатируются около 2 тысяч электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями типов ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ80ТК, 2(3,4) ЭС5К «Ермак», предназначенных для вождения грузовых поездов. Из перечисленных типов электровозов в настоящее время заводом НЭВЗ выпускаются только электровозы 2(3,4) ЭС5К «Ермак» [1]. На всех этих электровозах применен тяговый электропривод на основе двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением (коллекторный привод). В последние годы выпущены несколько типов грузовых

электровозов переменного тока, имеющих тяговые электроприводы на основе асинхронных двигателей трехфазного переменного тока с короткозамкнутым ротором (асинхронный привод). Так, с этим видом электропривода выпущена опытная партия из пяти электровозов типа 2ЭС5 [2] и один электровоз 2ЭС7.

На магистральных железных дорогах Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока, на которых уже достаточно много лет организовано движение грузовых поездов больших массы и длины, остро стоит проблема энергосбережения, повышения надежности и безопасности при

эксплуатации тягового подвижного состава. В этой связи работа современного электровоза переменного тока, предназначенного для движения грузовых поездов, должна сопровождаться оценкой его эксплуатации по двум критериям:

- электровоз должен обладать в широком диапазоне скоростей высокой энергетической эффективностью, основанной на высоких значениях энергетических показателей – коэффициентах мощности и полезного действия, в режимах тяги и электрического рекуперативного торможения;

- электровоз должен обладать в широком диапазоне скоростей такими регулировочными способностями, при которых обеспечиваются меньший расход электрической энергии из сети в режиме тяги и больший ее возврат в сеть в режиме рекуперативного торможения.

Такая постановка вопроса связана с тем, что современный многосекционный электровоз переменного тока представляет собой дорогостоящее устройство большой мощности (более 1 МВт), которое является очень сложной технической системой, содержащей многочисленное механическое, электрическое и электронное оборудование. Например, стоимость двухсекционного электровоза лежит в диапазоне 100–120 млн руб., а жизненный цикл его эксплуатации составляет 40 лет. Затраты электроэнергии электровозом на движение только одного грузового поезда массой 6300 т на расчетном участке железной дороги длиной 350–400 км измеряются величиной в 20000–25000 кВт·ч. Все эти цифры показывают, что локомотивное хозяйство железных дорог несет очень большие затраты на эксплуатацию электровозов. Исходя из этого, очень важно, чтобы эксплуатационные расходы на их работу были как можно меньше, особенно затраты электроэнергии на тягу поездов. Рассмотрим более подробно эти два критерия.

Высокая энергетическая эффективность работы электровоза переменного тока заключается прежде всего в достижении в широком диапазоне скоростей высоких значений коэффициента мощности преобразователей (не менее 0,95) и коэффициента полезного действия в целом всего электровоза (не менее 0,86) в номинальном режиме его работы как в тяге, так и при рекуперативном торможении. Высокий уровень коэффициента мощности позволяет значительно снизить потребление из сети реактивной мощности и поднять уровень использования активной мощности, затрачиваемой на выполнение полезной работы электровоза – тягу поездов на участке железной дороги. В режиме рекуперативного торможения высокий коэффициент мощности позволяет значительно снизить потребление из сети реактивной мощности и больше возратить активной электроэнергии в сеть. Более высокое значение коэффициента полезного действия в обоих режимах работы позволяет уменьшить потери активной мощности в электрооборудовании электровоза.

Наличие у электровоза в широком диапазоне скоростей регулировочных способностей в режиме тяги, при которых обеспечивается меньший расход электрической энергии из сети, заключается в возможности электровоза с помощью своих тяговых характеристик регулировать скорость движения поезда в диапазоне средних (30–50 км/ч) и высоких (50–90 км/ч) скоростей так, чтобы при увеличении скорости потребляемая двигателями мощность уменьшалась. Этого можно достичь, если с увеличением скорости сила тяги будет значительно (в квадратичной зависимости) уменьшаться, то есть сила тяги электровоза меняется обратно пропорционально скорости его движения, когда при увеличении скорости в два раза сила тяги уменьшается в четыре раза и т.д. В результате мощность как произведение значительно уменьшающейся силы тяги на увеличивающуюся скорость будет в целом уменьшаться. Наличие у электровоза в широком диапазоне скоростей регулировочных способностей в режиме рекуперативного торможения, при которых обеспечивается больший возврат электроэнергии в сеть, заключается в возможности электровоза с помощью своих тормозных характеристик регулировать скорость движения поезда в диапазоне средних

(30–50 км/ч) и высоких (50–90 км/ч) скоростей так, чтобы при увеличении скорости возвращаемая в сеть мощность генераторов увеличивалась. Этого можно достичь, если с увеличением скорости сила торможения будет также увеличиваться, то есть сила торможения электровоза меняется прямо пропорционально скорости его движения, когда при увеличении скорости сила торможения увеличивается пропорционально изменению скорости. В результате мощность как произведение увеличивающейся силы торможения на увеличивающуюся скорость будет также увеличиваться.

В то же время в режиме тяги при движении поезда в диапазоне низких (15–30 км/ч) и средних (30–50 км/ч) скоростей на расчетных подъемах и других трудных участках дороги со сложным перевалистым профилем пути, когда силы сопротивления движению поезда увеличены, регулировочные способности электровоза должны быть такими, чтобы обеспечить поддержание максимальной силы тяги вблизи предела сцепления с некоторым увеличением потребляемой мощности по сравнению с диапазоном высоких скоростей. В этом случае главным показателем работы электровоза является преодоление подъемов с большим уклоном профиля пути ценой снижения скорости и несколько увеличенного расхода электроэнергии. В режиме рекуперативного торможения на спусках с большим уклоном пути в этих же диапазонах скоростей регулировочные способности электровоза должны быть такими, чтобы поддерживать постоянство скорости с помощью максимальной тормозной силы вблизи предела сцепления, при которой происходит некоторое уменьшение возвращаемой в сеть мощности по сравнению с диапазоном высоких скоростей. В этом случае более важным показателем работы электровоза является возможность удержания поезда на спуске с помощью электрического тормоза на допустимой по безопасности величине скорости.

Выполнение рассмотренных критериев определяет требования к выбору вида тягового электропривода (коллекторного или асинхронного) для грузовых электровозов переменного тока.

В случае выбора коллекторного привода требование по достижению высоких значений коэффициентов мощности

величиной не менее 0,95 и полезного действия не менее 0,86 сегодня можно выполнить лишь на пути использования в современных электровозах новых перспективных силовых полупроводниковых преобразователей, таких как, например, выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП) и выпрямительные установки возбуждения (ВУВ) на основе применения силовых IGBT-транзисторов. В настоящее время ИрГУПС выполнены научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по применению на электровозах 2(3,4) ЭС5К путем их модернизации новых транзисторных ВИП и ВУВ, с помощью которых достигаются необходимые коэффициенты мощности (0,95) и полезного действия (0,86). Выполнение требования наличия у электровоза в режиме тяги в диапазоне средних и высоких скоростей регулировочных способностей, при которых обеспечивается меньший расход электрической энергии из сети, достигается тем, что электровоз с тяговым коллекторным приводом имеет нефиксированные мягкие тяговые характеристики $F = f(V)$, которые имеют обратно пропорциональную зависимость между силой тяги и скоростью движения электровоза. Эти характеристики позволяют выполнять все требования по регулированию скорости, описанные выше. Надо учесть и то, что мягкие характеристики позволяют осуществлять в зоне низких и средних скоростей движения грузового поезда по трудному профилю пути удобный закон регулирования силы тяги с сохранением ее максимальных значений за счет снижения скорости. Это является очень важным фактором возможности электровоза по преодолению подъемов большой крутизны (например, на горном профиле пути) ценой снижения скорости до допустимых величин. При этом потребление электроэнергии электровозом несколько повышается за счет реализации повышенных значений силы тяги. Выполнение требования наличия у электровоза в режиме рекуперативного торможения регулировочных способностей в диапазоне средних и высоких скоростей, при которых обеспечивается больший возврат электрической энергии в сеть, достигается тем, что электровоз с коллекторным приводом на основе применения двигателей в режиме генератора постоянного тока с независимым возбуждением имеет не-

фиксированные мягкие тормозные характеристики $B = f(V)$, которые имеют прямо пропорциональную зависимость между силой торможения и скоростью движения электровоза, когда при увеличении скорости сила торможения также увеличивается. В этом случае выполняется требование и по обеспечению механической устойчивости системы рекуперативного торможения. Таким образом, мягкие тормозные характеристики позволяют выполнить все требования по регулированию скорости в режиме рекуперативного торможения, описанные выше, а также по обеспечению его механической устойчивости.

В случае выбора асинхронного привода требование по достижению высоких значений коэффициентов мощности величиной не менее 0,95 и полезного действия не менее 0,86 осуществляется с помощью применения преобразователя частоты, состоящего из управляемых выпрямителя и автономного инвертора, выполненных на основе применения силовых IGBT-транзисторов.

Требование наличия у электровоза в режиме тяги регулировочных способностей в диапазоне средних и высоких скоростей, при которых обеспечивается наименьший расход электрической энергии из сети, не выполняется по причине отсутствия у электровоза с асинхронным приводом нефиксированных мягких тяговых характеристик. Требование наличия у электровоза в режиме рекуперативного торможения регулировочных способностей в диапазоне средних и высоких скоростей, при которых обеспечивается наибольший возврат электрической энергии в сеть, не выполняется по причине отсутствия у электровоза с асинхронным приводом нефиксированных мягких тормозных характеристик. Рассмотрим причины невыполнения в асинхронном приводе требований наличия у электровоза необходимых с точки зрения энергетической эффективности регулировочных способностей.

В теории электропривода известно [3], что асинхронные двигатели имеют жесткие механические характеристики $M = f(n)$, которые при применении асинхронных двигателей на электровозе преобразуются в нефиксированные жесткие тяговые характеристики электровоза $F = f(V)$. Асинхронные двигатели в режиме генератора имеют жесткие механические характеристики $M = f(n)$,

которые при применении асинхронных двигателей на электровозе преобразуются в нефиксированные жесткие тормозные характеристики электровоза $B = f(V)$.

Рассмотрим в равных условиях эксплуатации причины повышенного расхода электроэнергии в режиме тяги поезда в диапазоне средних и высоких скоростей у электровоза с асинхронным приводом по сравнению с электровозом с коллекторным приводом.

Вначале рассмотрим условия возможности регулирования скорости движения электровоза с асинхронным приводом на примере регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя в зависимости от закона регулирования частоты тока и напряжения в статорных обмотках двигателя. Известно, что с помощью силовых полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ) можно регулировать частоту вращения ротора асинхронных двигателей. В этом случае при изменении частоты тока в статорных обмотках двигателя f_1 меняется и синхронная частота вращения магнитного поля статора n_1 :

$$n_1 = f_1 \cdot 60 / p,$$

где p – число пар полюсов в статоре.

В результате меняется и частота вращения ротора n двигателя. При этом максимальный момент вращения M_{\max} ротора асинхронного двигателя зависит не только от частоты тока f_1 в статорных обмотках, но и от напряжения U_1 в них:

$$M_{\max} \approx C \cdot U_1^2 / f_1^2, \quad (1)$$

где C – постоянный коэффициент для данного двигателя, который можно определить по формуле $C = m_1 \cdot p / 8\pi^2 \cdot L_k$ (где m_1 – число фаз, L_k – индуктивность обмотки статора).

Отсюда видно, что M_{\max} двигателя зависит от частоты и напряжения на статоре. Это, в свою очередь, влияет на перегрузочную способность двигателя $\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}}$. Поэтому для сохранения перегрузочной способности асинхронного двигателя (эта способность является очень важным фактором эксплуатации локомотива при электрической тяге) необходимо с изменением синхронной частоты f_1 одновременно менять и напряжение U_1 на обмотках статора. Характер одновременного изменения f_1 и U_1 зависит от вида графика изменения статического момента нагрузки M_c в конкретном электроприводе.

На рис. 1 представлены механические характеристики двигателя $n = f(M)$ совместно с характеристикой статического момента нагрузки $M_c = f(n)$, в которой M_c имеет постоянную величину (то есть не изменяется) во всем диапазоне изменения частоты вращения ротора n двигателя. В этих условиях мощность P и частота вращения ротора n двигателя регулируются при соблюдении условия постоянства его момента вращения M , который преодолевает статический момент нагрузки M_c :

$$M = 9,55 P / n \approx \text{const}. \quad (2)$$

В этом случае напряжение U_1 на статоре необходимо изменять пропорционально изменению синхронной частоты тока f_1 в обмотках статора:

$$U_1 = U_{1\text{ном}} \cdot (f_1 / f_{1\text{ном}}),$$

где $U_{1\text{ном}}$ и $f_{1\text{ном}}$ – номинальные значения напряжения и синхронной частоты тока в обмотках статора, U_1 и f_1 – фактические значения напряжения и частоты тока в статоре.

Из формулы (1) следует, что при условии постоянства момента вращения M величину напряжения U_1 необходимо регулировать пропорционально изменению величины f_1 , то есть необходимо соблюдать условие постоянства соотношения $U_1 / f_1 = \text{const}$. Механические характеристики двигателя при изменяющихся значениях частоты тока f_1 и напряжения U_1 в этом случае показаны на рис. 1.

Механические характеристики остаются жесткими во всем диапазоне изменения нагрузки, и перегрузочная способность двигателя также остается неизменной. Однако при увеличении частоты тока f_1 выше номинального ее значения $f_{1\text{ном}}$ напряжение U_1 нельзя повышать выше $U_{1\text{ном}}$ по условиям эксплуатации двигателей, и его оставляют равным номинальному значению. В этом случае при повышении частоты f_1 выше номинального значения $f_{1\text{ном}}$ максимальный момент вращения M_{\max} уменьшается, а следовательно, уменьшается и перегрузочная способность двигателя $\lambda = M_{\max} / M$. На рис. 1 этому режиму работы двигателя соответствует характеристика при частоте тока статора $f_{14} > f_1 = f_{1\text{ном}}$. Потребляемая двигателем мощность P при этом способе регулирования определяется произведением постоянного момента вращения M на изменяющуюся частоту вращения ротора n , то есть P увеличивается при

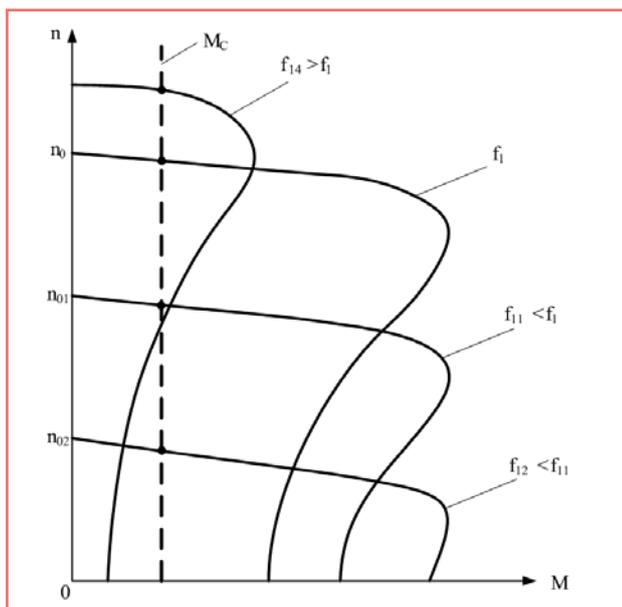


Рис. 1. Механические характеристики асинхронного двигателя при одновременном регулировании U_1 и f_1 по условию постоянства соотношения $U_1 / f_1 = \text{const}$.

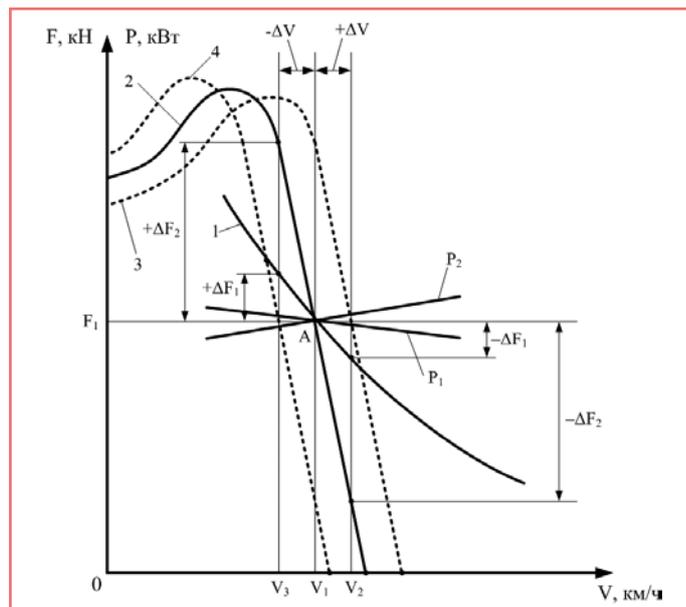


Рис. 2. Сравнение тяговых характеристик $F = f(V)$ и характеристик мощности $P = f(V)$ двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении скорости на величину ΔV .

увеличении n и уменьшается при ее уменьшении.

Вообще под нагрузкой привода понимается изменение статического момента сопротивления рабочего механизма, который преодолевается двигателем при его вращении. В условиях работы тягового электропривода на электровозе таким статическим моментом сопротивления нагрузки является сопротивление движению электровоза с поездом, которое возникает от профиля пути (подъемы, площадки и кривые рельсовой колеи) участка железной дороги и вагонов состава. Это сопротивление, в свою очередь, зависит от величины скорости поезда (увеличивается с ростом скорости и наоборот). Эта нагрузка, в отличие от многих приводов промышленности, изменяется в очень широких пределах (от минимума на площадках и спусках пути до максимума на подъемах с кривыми рельсовой колеи). Все это требует выбора такого закона регулирования, который бы решал две задачи: первая – движение грузового поезда расчетной массы в соответствии с графиком скоростей по участку железной дороги и с возможностью преодоления различных сил сопротивления движению, включая и расчетные подъемы; вторая – минимальные затраты электроэнергии электровозом на тягу поезда (главный энергетический показатель его работы).

Влияние нагрузки на реализацию момента вращения M на валу двигателя

или силы тяги F на автосцепке видно из рассмотрения характера зависимости между M и n или между F и V . Причем механические характеристики двигателя $n = f(M)$ отличаются от тяговых характеристик двигателя или электровоза $F = f(V)$ только тем, что зависимость $n = f(M)$ рассматривается не на автосцепке электровоза, а на валу ротора двигателя и не учитывает коэффициентов механической передачи и ее полезного действия при передаче момента вращения от вала двигателя к колесу и далее к автосцепке электровоза. При этом в механической характеристике $n = f(M)$ функция n изменяется на V , а аргумент M – на F , и в тяговой характеристике $F = f(V)$ эти параметры меняются местами.

На рис. 2 представлены мягкая тяговая характеристика 1 коллекторного двигателя и жесткая тяговая характеристика 2 асинхронного двигателя, которые проходят через точку равновесия A , от которой произошло небольшое изменение скорости на ее увеличение ($+\Delta V$) или на уменьшение ($-\Delta V$) под действием изменения сопротивления движению поезда. Кроме этих характеристик на рис. 2 изображены еще две жесткие тяговые характеристики 3 и 4 асинхронного двигателя с другими параметрами U_1 и f_1 преобразователя частоты.

При изменении скорости от точки равновесия A на небольшую величину $+\Delta V$ или $-\Delta V$ на мягкой тяговой харак-

теристике 1, соответственно, происходит изменение силы тяги на величины $-\Delta F_1$ или $+\Delta F_1$, а на жесткой тяговой характеристике 2 эти изменения имеют значительно большие величины, чем ΔF_1 , а именно $-\Delta F_2$ или $+\Delta F_2$ соответственно.

Если сравнивать в равных условиях эксплуатации действие этого механизма изменения параметров V и F на реализацию тяговых характеристик и характеристик потребляемой мощности для электровоза с асинхронным приводом, то можно сказать следующее. На рис. 2 видно, что в условиях изменения скорости от V_1 на величину $+\Delta V$ или $-\Delta V$ регулировать дальше силу тяги F по данной жесткой тяговой характеристике 2 при большем изменении скорости, чем ΔV , уже нельзя по причине ее значительного изменения (больше чем ΔF_2) и изменения частоты скольжения ротора. Это недопустимо с точки зрения управления процессом движения.

В этих условиях, как только изменилась на небольшую величину ΔV скорость движения электровоза (а это значит, и частота вращения ротора двигателя) ради сохранения номинальной величины скольжения ротора двигателя, система автоматики управления обязана перейти на новую жесткую тяговую характеристику (кривые 3 или 4) с другой величиной синхронной частоты тока f_1 и напряжения U_1 на статоре. Этот переход на новую характеристику ведет к сохранению прежней силы тяги

F_1 , которая была в точке А, при новой величине скорости (V_2 или V_3), что ведет при увеличении скорости к увеличению потребляемой мощности, а при уменьшении скорости – к ее уменьшению. Переход на новую характеристику необходим, чтобы реализовать принцип регулирования $M \approx \text{const}$, когда потребляемая двигателем мощность изменяется пропорционально изменению частоты вращения n его ротора (см. формулу (2)). В этом случае с ростом частоты вращения ротора (иначе – скорости движения электровоза) потребляемая двигателями электровоза мощность будет увеличиваться (кривая P_2), а значит, будет увеличиваться и расход электроэнергии на тягу поезда.

Таким образом, электровоз с асинхронным приводом не может автоматически регулировать величину своей скорости даже в небольшом диапазоне ее изменения, находясь на одной и той же тяговой характеристике без изменения величин частоты тока f_1 и напряжения U_1 на статоре двигателя. Чтобы осуществлять автоматическое регулирование скорости, система управления должна постоянно переходить с одной жесткой тяговой характеристики двигателя на другую, сохраняя одну и ту же величину силы тяги. Автоматически регулируемая тяговая характеристика $F = f(V)$ электровоза, построенная по этому принципу, должна иметь зависимость $F(V) \approx \text{const}$, то есть вид горизонтальной прямой, расположенной параллельно оси скорости. При таком законе регулирования, как было сказано выше, происходит значительное увеличение потребляемой мощности, а значит, и расхода электроэнергии электровозом при увеличении его скорости движения. Ради уменьшения потребляемой мощности вид автоматически регулируемой тяговой характеристики можно изменить (как это и сделано на электровозе 2ЭС5), если при увеличении скорости переход на каждую новую нефиксированную жесткую тяговую характеристику двигателя выполнять с некоторым уменьшением частоты скольжения ротора, что вызовет уменьшение тока ротора двигателя, а значит, и уменьшение его силы тяги. В этом случае автоматически регулируемая тяговая характеристика будет иметь вид снижающейся кривой в сторону увеличения скорости, то есть будет иметь обратную зависимость между F и V . Однако отрицательный коэф-

фициент относительной жесткости (коэффициент наклона) $K_F = -\Delta F/\Delta V$ такой характеристики будет иметь небольшую величину, что значительно меньше, чем у регулируемой мягкой тяговой характеристики электровоза с коллекторным приводом. В результате потребляемая мощность как произведение незначительно уменьшенной величины силы тяги на увеличенную в большей степени величину скорости будет в целом увеличиваться или, в лучшем случае, оставаться на прежнем уровне (быть постоянной по величине) при увеличении скорости, что приведет к увеличению в большей или меньшей степени расхода электроэнергии на тягу поезда. Такой принцип регулирования скорости движения для электровозов переменного тока является неэффективным с точки зрения затрат электроэнергии на тягу поезда. И тем не менее этот принцип заложен в основу регулирования скорости движения электровоза 2ЭС5 с асинхронными тяговыми двигателями. Опытная эксплуатация в течение года пяти электровозов 2ЭС5 на базе асинхронного привода с грузовыми поездами на участке Тайшет – Вихоревка – Северобайкальск показала, что удельный расход электроэнергии на тягу поездов у этих электровозов выше на 15–20%, чем в таких же условиях у электровозов 3ЭС5К на базе коллекторного привода.

Совсем иначе происходят процессы регулирования скорости электровоза в режиме тяги при наличии мягких тяговых характеристик коллекторного привода. При изменении скорости на небольшую величину $+\Delta V$ или $-\Delta V$ на мягкой тяговой характеристике 1 происходит изменение силы тяги на величины $-\Delta F_1$ или $+\Delta F_1$ соответственно, что значительно меньше, чем ΔF_2 при жесткой тяговой характеристике асинхронного двигателя. Следовательно, в условиях большего изменения скорости, чем ΔV , регулировать дальше силу тяги по данной мягкой тяговой характеристике 1 можно достаточно долго и в достаточно широком диапазоне изменения (0–30 км/ч) скорости движения. Это дает возможность электровозу автоматически регулировать необходимую величину скорости, находясь на одной и той же тяговой характеристике без изменения величины напряжения на двигателях, и не переходить без необходимости на другие тяговые характеристики. Используя накопленную кинетическую энергию

поезда, машинист может управлять движением электровоза на такой мягкой тяговой характеристике с достаточно большим изменением скорости. Так, например, машинист при движении поезда по профилю пути участка большой длины с различной величиной уклонов на подъемах и спусках при необходимости может оставаться на одной и той же характеристике 3-й зоны регулирования, начиная от скорости 40 км/ч в начале участка и до скорости 70 км/ч в конце него. При таком движении характеристика потребляемой мощности $P = f(V)$ так же, как и тяговая характеристика, имеет мягкий характер с обратной пропорциональной зависимостью между P и V , то есть с увеличением скорости V мощность P уменьшается (кривая P_1) и наоборот. Такое регулирование в широком диапазоне скоростей и особенно в диапазоне высоких значений скорости (50–90 км/ч) является экономически выгодным для эксплуатации электровозов переменного тока.

В режиме рекуперативного торможения нефиксированные тормозные характеристики электровоза с коллекторным приводом имеют несколько больший коэффициент относительной жесткости, чем мягкие тяговые характеристики, однако их можно отнести к категории мягких характеристик. При наличии таких тормозных характеристик электровоза небольшое увеличение или уменьшение скорости движения по причине изменения профиля пути вызывает несколько большее, чем изменение скорости, увеличение или уменьшение силы торможения соответственно, что дает возможность электровозу автоматически поддерживать постоянство необходимой величины скорости, от которой произошло отклонение (сохраняется механическая устойчивость торможения). В этом случае электровоз использует одну и ту же тормозную характеристику электровоза, осуществляя регулирование скорости по ней автоматически без внешнего изменения величины напряжения инвертора и генератора.

На рис. 3 представлены мягкая тормозная характеристика 1 коллекторного двигателя и жесткая тормозная характеристика 2 асинхронного двигателя в режимах генератора, которые проходят через точку равновесия А, от которой произошло небольшое изменение скорости как в сторону увеличения ($+\Delta V$), так и уменьшения ($-\Delta V$) под действием изменения профиля пути. Кроме этих

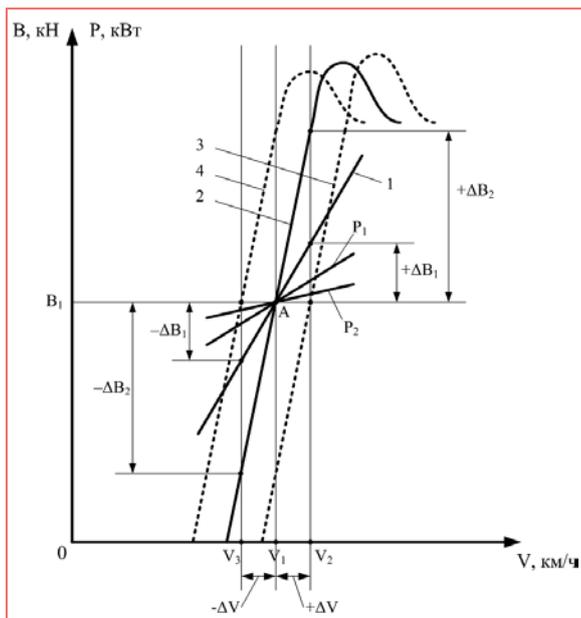


Рис. 3. Сравнение тормозных характеристик $B = f(V)$ и характеристик мощности $P = f(V)$ двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в режиме генератора при изменении скорости на величину ΔV .

характеристик на рис. 3 изображены жесткие тормозные характеристики 3 и 4 асинхронного двигателя в режиме генератора с другими параметрами U_1 и f_1 преобразователя частоты.

При изменении скорости от V_1 на небольшую величину $+\Delta V$ или $-\Delta V$ на мягкой тормозной характеристике 1 происходит изменение силы торможения от B_1 на несколько большую величину, чем изменение скорости, а именно на величину $+\Delta B_1$ или $-\Delta B_1$. На жесткой тормозной характеристике при изменении скорости происходит изменение силы торможения на значительно большую величину, чем ΔB_1 , а именно $+\Delta B_2$ или $-\Delta B_2$ соответственно.

Если сравнивать в равных условиях эксплуатации действие этого механизма на реализацию тормозных характеристик и характеристик возвращаемой в сеть мощности для электровоза с асинхронным приводом, то можно сказать следующее. На рис. 3 видно, что в условиях изменения скорости на величину $+\Delta V$ или $-\Delta V$ регулировать дальше силу торможения по жесткой тормозной характеристике 2 при большем изменении скорости, чем ΔV , уже нельзя в силу ее значительного изменения (больше чем ΔB_2) и изменения частоты скольжения ротора. Это недопустимо с точки зрения управления процессом движения. В этих условиях, как только изменилась скорость движения (а значит,

и частота вращения ротора генераторов) система автоматики управления обязана перейти на новую жесткую тормозную характеристику (кривые 3 или 4) с другой величиной синхронной частоты тока и напряжения на статоре. Этот переход на новую характеристику должен обеспечивать сохранение прежней силы торможения B_1 , которая была в точке А, при новой величине скорости (V_2 или V_3), а это ведет при увеличении скорости к некоторому увеличению возвращаемой в сеть мощности (кривая P_2), а при уменьшении скорости — к ее уменьшению. Переход на новую характеристику также необходимо,

чтобы реализовать принцип регулирования $M \approx \text{const}$, когда возвращаемая в сеть генератором мощность изменяется пропорционально изменению частоты вращения n его ротора. Следовательно, с ростом частоты вращения ротора возвращаемая в сеть генераторами электровоза мощность несколько увеличивается, а значит, увеличивается и возврат электроэнергии в сеть. Таким образом, электровоз с асинхронным приводом не может автоматически регулировать величину своей скорости даже в небольшом диапазоне ее изменения, находясь на одной и той же тормозной характеристике без изменения величин частоты тока f_1 и напряжения U_1 на статоре генератора. Чтобы осуществлять автоматическое регулирование скорости, система управления должна постоянно переходить с одной жесткой тормозной характеристики двигателя в режиме генератора на другую, сохраняя одну и ту же величину силы торможения B_1 . Автоматически регулируемая тормозная характеристика генератора, построенная по этому принципу, приближается к характеристике $B(V) \approx \text{const}$, то есть имеет вид горизонтальной прямой, расположенной параллельно оси скорости. При таком законе регулирования, как было сказано выше, происходит увеличение возвращаемой в сеть мощности, а значит, и увеличение возврата в сеть электроэнергии генераторов электровоза при увеличе-

нии скорости его движения. Однако на электровозе 2ЭС5 вид автоматически регулируемой тормозной характеристики несколько изменен в зоне высоких скоростей движения, а именно эта характеристика имеет вид снижающейся кривой в сторону увеличения скорости, то есть она имеет обратно пропорциональную зависимость между B и V . Такая характеристика получена следующим путем. Если при увеличении скорости электровоза переход на каждую новую характеристику двигателя в режиме генератора выполнять при условии некоторого уменьшения частоты скольжения ротора двигателя, а значит, и уменьшение его силы торможения. Однако отрицательный коэффициент относительной жесткости (коэффициент наклона) $K_B = -\Delta B / \Delta V$ такой характеристики будет иметь небольшую величину. В результате мощность как произведение уменьшенной величины силы торможения на увеличенную величину скорости будет в целом оставаться на неизменном уровне (постоянной по величине) при увеличении скорости, что приведет к увеличению в меньшей степени возврата электроэнергии в сеть, чем при наличии зависимости $B(V) \approx \text{const}$. Такой принцип регулирования скорости движения для электровозов переменного тока является неэффективным с точки зрения увеличения количества возвращенной в сеть электроэнергии.

Процессы регулирования скорости при наличии мягких тормозных характеристик электровоза с коллекторным приводом происходят иначе. При изменении скорости на небольшую величину $+\Delta V$ или $-\Delta V$ на мягкой тормозной характеристике 1 происходит изменение силы торможения на величину $+\Delta B_1$ или $-\Delta B_1$ соответственно, что значительно меньше, чем ΔB_2 при жесткой тяговой характеристике асинхронного двигателя в режиме генератора. Следовательно, в условиях большего изменения скорости, чем ΔV , регулировать дальше силу торможения по данной мягкой тормозной характеристике 1 можно достаточно долго и в широком диапазоне изменения скорости движения. Это дает возможность электровозу автоматически регулировать необходимую величину скорости, находясь на одной и той же тяговой характеристике без изменения величины напряжения инвертора

и генератора, и не переходить без необходимости на другие тормозные характеристики. Используя накопленную кинетическую энергию поезда, машинист может управлять движением электровоза по такой мягкой тормозной характеристике с большим, чем у асинхронного привода, изменением скорости (0–10 км/ч). Особенно это сильно проявляется при движении электровоза с поездом по спускам достаточно легкого профиля пути в диапазоне высоких скоростей. При таком движении характеристика возвращаемой в сеть мощности $P = f(V)$ так же, как и тормозная характеристика, имеет мягкий характер с прямо пропорциональной зависимостью между P и V , то есть при увеличении скорости V мощность P тоже увеличивается (кривая P_1). Причем увеличение возвращаемой в сеть мощности происходит на большую величину, чем у асинхронного двигателя в режиме генератора (кривая P_2). Такое регулирование в широком диапазоне скоростей является более эффективным с точки зрения возврата большего количества электроэнергии в сеть. Особенно это проявляется в диапазоне высоких значений скорости (50–90 км/ч), что является экономически выгодным для эксплуатации электровозов переменного тока.

Выводы

1. Проведенный сравнительный анализ свойств тяговых характеристик и характеристик мощности электровозов с коллекторным и асинхронным приводами и их влияния на энергетическую эффективность электровозов показал, что при равенстве энергетических показателей (коэффициенты мощности и полезного действия) электровоз с коллекторным приводом имеет лучшие регулировочные способности, чем электровоз с асинхронным приводом, за счет наличия нефиксированных мягких тяговых и тормозных характеристик.

2. Эти характеристики приводят при увеличении скорости движения электровоза в режиме тяги к меньшему расходу электроэнергии, а в режиме рекуперативного торможения – к большему возврату электроэнергии в сеть. В то же время, сообразуясь с профилем пути, система автоматического управления электровоза может осуществлять регулирование скорости в достаточно широком диапазоне ее изменения (0–30 км/ч), оставаясь на одной и той же

нефиксированной мягкой тяговой или тормозной характеристике, и не переходить без необходимости на другие характеристики. В результате энергетическая эффективность электровоза усиливается. Такой возможности у асинхронного привода нет.

Литература

1. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142.009РЭ1 (ЗТС.001.012РЭ1). – НПО «НЭВЗ», Новочеркасск, 2004. – 253 с.
2. Электровоз магистральный 2ЭС5. Технические условия ЗТС.001.018 ТУ. – ООО «ПК НЭВЗ», Новочеркасск, 2014. – 103 с.
3. Кацман М.М. Электрический привод. – Учебник, 4-е издание. – М.: Изд. центр «Академия», 2011. – 384 с.

Власьевский Станислав Васильевич

Родился в 1939 году. В 1966 году окончил Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрификация железных дорог». Доктор технических наук, профессор. В 2001 году защитил докторскую диссертацию по теме «Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов однофазно-постоянного тока с рекуперативным торможением». Опыт работы – 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» ФГБОУ «ДВГУПС». Имеет 180 научных работ, в том числе 24 патента. Награжден знаками «Почетный работник науки и техники РФ», «Почетный железнодорожник», «Лучший изобретатель железнодорожного транспорта», «200 лет транспортному образованию России» и «30 лет Байкало-Амурской магистрали».

Мельниченко Олег Валерьевич

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Иркутский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Кандидат технических наук, доцент. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Повышение энергетических показателей электровозов однофазно-постоянного тока с тиристорными выпрямителями». Опыт работы – 16 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электроподвижной состав» ФГБОУ «ИрГУПС». Имеет 226 научных трудов, в том числе 55 патентов на изобретения и полезные модели. Награжден отраслевыми наградами ОАО «РЖД».

Малышева Ольга Александровна

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС) по специальности «Электроснабжение железных дорог». Кандидат технических наук, доцент. В 2008 году защитила диссертацию по теме «Внутрисистемный учет электрической энергии и контроль ее качества на электровозах переменного тока». Опыт работы – 14 лет. В настоящее время работает заведующей кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика» ФГБОУ «ДВГУПС». Имеет 32 научных труда.

Грибенюк Денис Владимирович

Родился в 1987 году. В 2011 году окончил Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС) по специальности «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время работает машинистом-инструктором по обучению локомотивных бригад в эксплуатационном локомотивном депо «Хабаровск-2» Дальневосточной железной дороги и учится в аспирантуре ДВГУПС. Имеет 5 научных статей.

Vlasyevskiy Stanislav

Was born in 1939. In 1966 he graduated from Khabarovsk Railway Transport Engineers Institute with a degree «Railways Electrification». Doctor of Engineering Science, professor. In 2001 he defended his Doctor dissertation on the subject «Efficiency increasing of reversible converters of locomotives of single-phase direct current with regeneration braking». He has 50 years of work experience. At the present time he works as the professor of «Electric Engineering, electronics and electromechanics» Department of the Far East State Communications University. He has 180 publications, including 24 patents. He was awarded with the following decorations «Honorable worker of science and technics of RF», «Honorable railwayman», «The best inventor of Railways», «200 years' anniversary of transport education of Russia» and «30 years' anniversary of Baikal-Amur Mainline».

Melnichenko Oleg

Was born in 1976. In 1999 he graduated from Irkutsk Railway Transport Engineers Institute with a degree «Electrical vehicle of railways». Candidate of Engineering Science, assistant professor. In 2005 he defended his dissertation on the subject «Increasing of energy indicators of locomotives of single-phase direct current with thyristor rectifiers». He has 16 years of work experience. At the present time he works as the head of «Electrically propelled vehicles» Department of Irkutsk Railway Transport Engineers Institute. He has 226 publications, including 55 patents for inventions and useful models. He was awarded with industry awards of «Russian Railways» Ltd.

Malysheva Olga

Was born in 1983. In 2005 she graduated from Far Eastern State Transport University (DVGUPS) with specialization in «Electrical supply of railroads». She is a Candidate of Engineering Sciences, associate professor. In 2008 she defended a thesis in the subject «Internal accounting of electric power and its quality control on AC locomotives». Her work experience is 14 years. At present she works as head of the department «Electrotechnics, electronics and electromechanics» of FGBOU «DVGUPS». She is an author of 32 publications.

Gribenyuk Denis

Was born in 1987. In 2011 he graduated from Far Eastern State Transport University (DVGUPS) with specialization in «Electrotechnics, electromechanics and electrotechnologies». His work experience is 7 years. At present he works as locomotive driver-training instructor of locomotive teams in the operation locomotive depot Khabarovsk-2 of the Far Eastern railroad and he is a postgraduate student of «DVGUPS». He has 5 scientific articles.

Автоматизированная система вентиляции электродвигателя

// Automated ventilation system for electric motor //

**Доманов В.И., к.т.н.,
Доманов А.В., к.т.н.,
Сердцева А.В.,
ФГБОУ ВО «УлГТУ», г. Ульяновск**

В статье рассматривается система управляемой вентиляции электродвигателя. Выполнен анализ теплового баланса и получено выражение, позволяющее учесть влажность и интенсивность вентиляции. Составлены структурные схемы тепловой модели двигателя и автоматизированной системы управления. Проведено моделирование и получены графики переходных процессов для различных режимов работы. Выполнен анализ и получена зависимость установившегося значения превышения температуры от тепловой мощности. Показано влияние инерционности электропривода вентилятора на работу системы.

Ключевые слова: тепловая модель, теплоемкость, теплоотдача, скорость вентиляции, превышение температуры.

В процессе работы электродвигателей происходит их нагрев. Это накладывает ограничения на режимы работы электропривода. Известно, что анализ тепловых режимов машины можно выполнить при некоторых допущениях, не искажающих картину процессов нагрева.

В частности, в первом приближении двигатель можно представить в виде одномассового однородного тела, при этом мощность теплоотдачи машины в окружающую среду равна произведению разности температур между ними и коэффициента теплоотдачи.

Изменение температуры двигателя происходит при нарушении баланса тепловой мощности. Дифференциальное уравнение теплового баланса имеет вид [1, 2]

$$P = A\tau + c \frac{d\tau}{dt}, \quad (1)$$

где c – теплоемкость электрической машины,

*Considered controlled ventilation system for electric motor. The analysis of the heat balance and obtain an expression that allows to take into account the humidity and ventilation rate. Compiled block diagrams of motor thermal model and the automated control system. The simulation charts and received transients for different modes of operation. The analysis and the dependence of the steady value of temperature rise of thermal power. The influence of the inertia of the electric fan on system performance. **Keywords:** thermal model, heat capacity, heat transfer, ventilation rate, temperature rise.*

τ – превышение температурой машины температуры окружающей среды. Установившееся значение превышения температуры τ_{y1} определяется выражением

$$\tau_{y1} = \frac{\Delta P}{A}. \quad (2)$$

При этом реальная температура двигателя определяется с учетом температуры окружающей среды τ_0 :

$$\tau_d = \tau_0 + \tau_y.$$

По условиям эксплуатации, необходимо обеспечить соблюдение условия $\tau_d < \tau_{dmax}$.

Для этого широко используют вентиляцию электрооборудования. При этом происходит изменение теплоотдачи двигателя.

Известно уравнение теплового баланса, в котором учитываются скорость вентиляции V и влажность [3, 4]:

$$\Delta P = A_0\tau + c \frac{d\tau}{dt} + K_1V\tau + K_2BV, \quad (3)$$

где A_0 – коэффициент естественной теплоотдачи без вентиляции,

K_1 и K_2 – коэффициенты передачи.

На основании выражений (1, 3) можно составить структурную схему тепловой модели двигателя в условиях вентиляции (рис. 1).

Если нагрузка на двигатель переменная, то и тепловая мощность будет изменяться. В этом случае в целях энергоэф-

фективности целесообразно изменять скорость воздушного потока. Рассмотрим работу автоматизированной системы вентиляции. Сигнал с датчика температуры τ_d поступает на нелинейный элемент НЭ1. Он представляет собой пропорциональное звено с зоной нечувствительности. Это позволяет включать электропривод вентилятора обдува

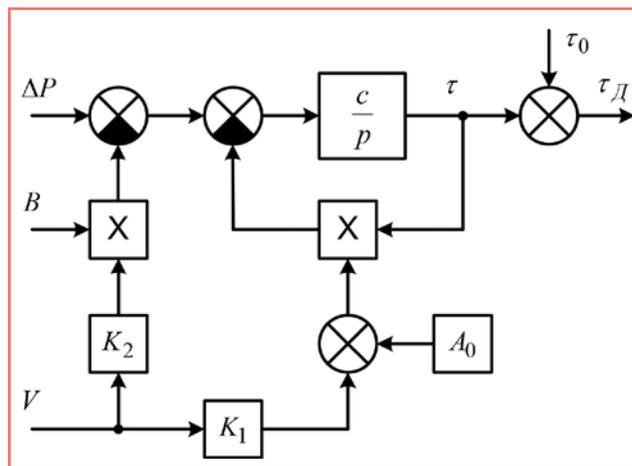


Рис. 1. Структурная схема тепловой модели двигателя в условиях вентиляции.

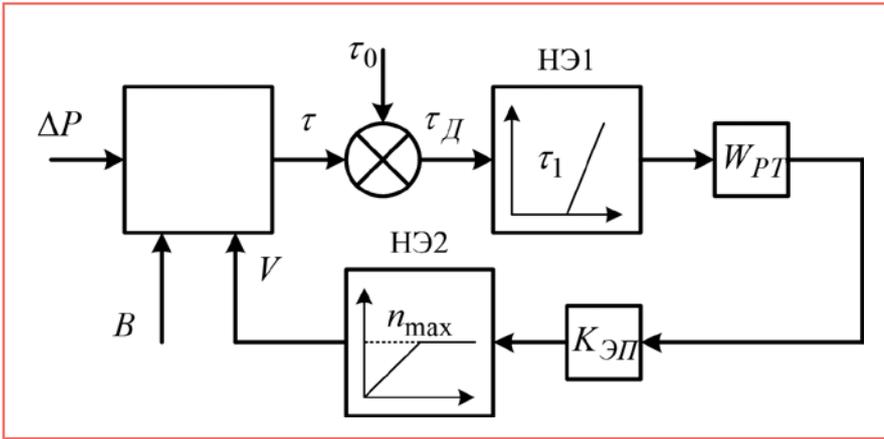


Рис. 2. Структурная схема автоматизированной системы вентиляции двигателя.

при достижении температурой машины значения τ_1 . С нелинейного звена сигнал поступает на регулятор температуры с передаточной функцией $W_{PT}(p)$, который, в свою очередь, управляет электроприводом вентилятора. Тепловые процессы в двигателе протекают достаточно медленно, поэтому первоначально передаточную функцию электропривода вентилятора можно представить коэффициентом $K_{ЭП}$. Скорость электропривода вентилятора имеет естественное ограничение n_{max} , поэтому на выходе вентилятора включен нелинейный элемент НЭ2. Он представляет собой линейное звено с насыщением. Структурная схема системы вентиляции двигателя приведена на рис. 2.

На основании структурной схемы (рис. 2) была составлена модель в программе МВТУ и проведено моделирование системы. На рис. 3 приведены переходные процессы, где 1 – процесс нагрева двигателя без вентиляции; 2 –

нагрев двигателя при работе автоматизированной системы без ограничения скорости вентиляции; 3 – работа автоматизированной системы с ограничением скорости вентиляции на уровне n_{max} .

Анализ переходных процессов позволяет сделать следующие выводы:

- управление вентиляцией в функции температуры превышения позволяет эффективно снижать температуру двигателя;
- увеличение скорости вентиляции снижает установившееся значение превышения температуры;
- ограничение скорости вентиляции n_{max} отражается на установившемся значении температуры: снижение n_{max} увеличивает τ_y ;
- изменение n_{max} позволяет получить семейство характеристик между линиями 1 и 2 на рис. 3.

Определим установившиеся значения превышения температуры для различных режимов работы системы

вентиляции двигателя. Первоначально считаем, что работа системы происходит в линейной зоне, то есть соблюдаются условия

$$\tau_d > \tau_1, n < n_{max}$$

В этом случае на основании формулы (3) можно получить выражение

$$\tau(p) \approx \frac{\Delta P(p)}{cp + [A_0 + K_{\Sigma}(\tau(p) - \tau_1)]}, \quad (4)$$

где $K_{\Sigma} = K_I K_{PT} K_{ЭП}$.

Для этого режима установившееся значение превышения температуры имеет вид

$$\tau_y \approx \frac{\Delta P}{A_0 + K_{\Sigma}(\tau_y - \tau_1)}$$

При условии $\tau_1 = 0$ можно получить выражение

$$\tau_{y2} \approx \sqrt{\frac{\Delta P}{K_{\Sigma}}}. \quad (5)$$

На основании формул (4, 5) можно построить график $\tau_y = f(\Delta P)$ (рис. 4). Отрезок 0–а характеризует работу на первом участке характеристики, когда $\tau < \tau_1$ и τ_y определяется выражением (2). На втором участке а–б $\tau > \tau_1$, но $n < n_{max}$ и τ_y определяется выражением

$$\tau_{\Sigma 1} = \frac{\Delta P_{1max}}{A_0} + \tau_{y2}. \quad (6)$$

Отрезок б–в соответствует режиму $n = n_{max}$ и τ_y находится по формуле

$$\tau_{\Sigma 2} = \frac{\Delta P_{1max}}{A_0} + \sqrt{\frac{\Delta P_{2max}}{K_{\Sigma}} + \frac{\Delta P_3}{A_{max}}}. \quad (7)$$

При этом момент перехода б и наклон характеристики б–в будут зависеть от величины n_{max} .

В реальных системах электропривод вентилятора имеет определенную инерционность. Это вызвано следующими причинами:

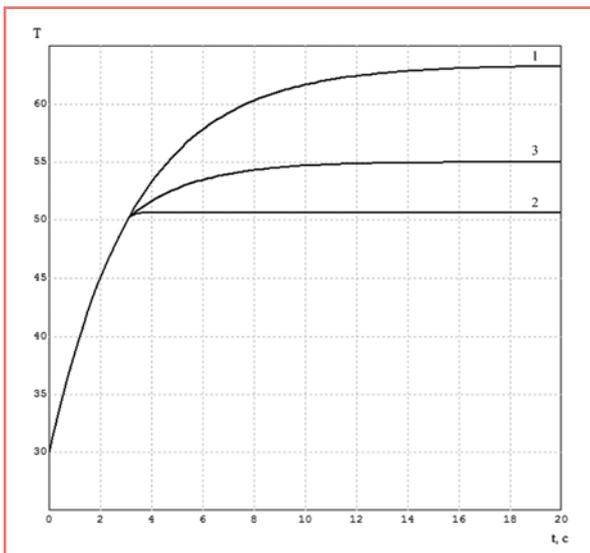


Рис. 3. Переходные процессы в системе.

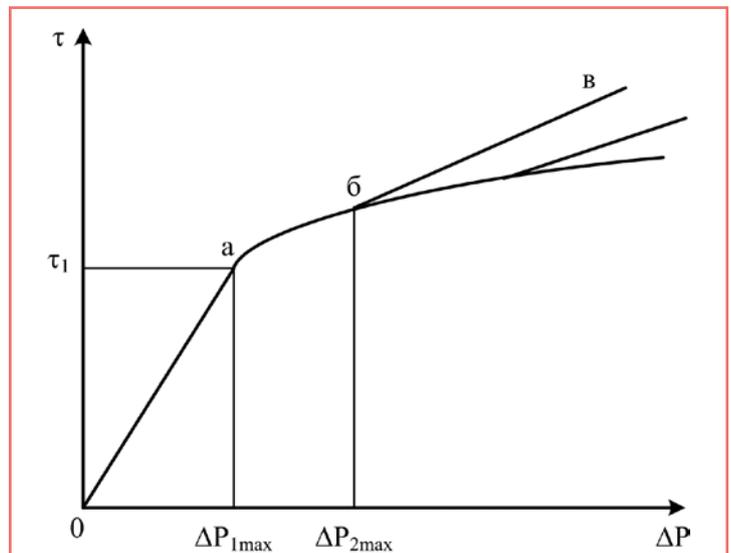


Рис. 4. Зависимость $\tau_y = f(\Delta P)$.

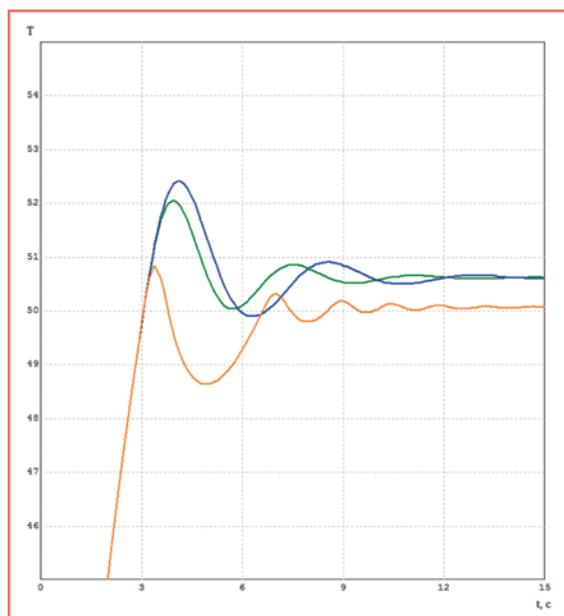


Рис. 5. Переходные процессы системы вентиляции с учетом инерционности электропривода.

- в таких электроприводах широко применяют тиристорные регуляторы напряжения, которые достаточно инерционны;

- вентилятор обладает существенным моментом инерции, что увеличивает электромеханическую постоянную этого привода.

Было проведено моделирование исследуемой системы, в которой электропривод вентилятора описывается апериодическим звеном. На рис. 5 приведены графики переходных процессов системы вентиляции для этих условий. Зеленым цветом обозначен график для $K_{ЭП} = 0,3$, $T_{ЭП} = 2$, синим — $K_{ЭП} = 0,3$, $T_{ЭП} = 3$, оранжевым — $K_{ЭП} = 3$, $T_{ЭП} = 3$.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- автоматизированная система вентиляции позволяет эффективно регулировать температуру электродвигателя в различных режимах;

- применение обратной связи по температуре двигателя позволяет управлять электроприводом вентиля-

тора, но при этом система становится существенно нелинейной;

- в случае использования инерционного электропривода вентилятора переходный процесс становится колебательным;

- установившееся значение превышения температуры зависит от интенсивности вентиляции и тепловой мощности двигателя.

Литература

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
2. Ковчин С.А. Теория электропривода / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
3. Инженерные сети, оборудова-

ние зданий и сооружений / под ред. Ю.П. Соснина. – М.: Высшая школа, 2008. – 415 с.

4. Бондарь Е.С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирование воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов и др. – Киев: «Аванпост-Прим», 2005. – 560 с.

Доманов Виктор Иванович

Родился в 1950 году. В 1972 году окончил Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». В 1980 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Методика расчета и исследования следящих систем с устройствами упреждающей коррекции для токарных станков с ЧПУ». Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 144 научных труда, автор 16 изобретений.

Доманов Андрей Викторович

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Ульяновский государственный технический университет по специальности «Измерительно-вычислительные комплексы и системы». В 2002 году защитил кандидатскую диссер-

тацию по теме «Разработка и исследование электроусилителя рулевого управления легковых автомобилей на основе бесконтактных двигателей». Кандидат технических наук, доцент, директор Экспертно-аналитического центра НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Имеет 107 научных трудов, автор 11 изобретений.

Сердцева Аксиния Владимировна

Родилась в 1992 году. В 2015 году окончила Московский государственный строительный университет. Аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет публикации в области электромеханики.

Domanov Viktor

Was born in 1950. In 1972 he graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute specializing in «Aircraft instrumentation». In 1980 has protected Ph. D. thesis by the theme «The method of calculation and research tracking systems with pre-emptive corrective devices for lathes numerically controlled». Ph. D., docent, head of Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has 144 scientific publications, author of 16 inventions.

Domanov Andrey

Was born in 1976. In 1999 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in «The measuring-computing complexes and systems». In 2002 has protected Ph. D. thesis by the theme «Development and investigation of electrical power steering of passenger cars on the basis of contactless engines». Ph. D., docent, director of Expert-Analytical Center SRTI of Ulyanovsk State University. He has 107 scientific publications, author of 11 inventions.

Serdceva Aksinia

Was born in 1992. In 2015 he graduated from Moscow State University of Civil Engineering. Postgraduate of Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. She has published articles in the field of electrical engineering.

Безотказность тяговых электродвигателей электропоездов серии ЭТ-2М в различных межремонтных периодах

// Reliability of traction motors of emu ET-2M series in various overhaul period //

Скробков А.В., к.т. н.,
МГУПС (МИИТ), г. Москва

Шарапов А.А.,
Центральная дирекция моторвагонного подвижного состава – филиал ОАО «РЖД», г. Москва

В статье рассмотрены вопросы использования показателей безотказности, рассчитанных по результатам эксплуатации, для анализа технического состояния изоляции обмоток тяговых электродвигателей электропоездов. Установлено, что в различных межремонтных периодах параметр потока отказов тяговых электродвигателей по причине пробоя изоляции обмоток отличается.

Ключевые слова: электропоезд, тяговый электродвигатель, безотказность, эксплуатация, параметр потока отказов.

Электропоезд как объект железнодорожной техники с точки зрения долговечности имеет достаточно продолжительный срок службы. При этом для поддержания его надежности в эксплуатации служит система технического обслуживания и ремонтов. В связи с этим можно предположить, что показатели безотказности однотипного оборудования электропоездов могут быть различными для разных межремонтных периодов, так как на их значения оказывает влияние большое количество различных факторов, среди которых в первую очередь можно выделить процесс естественного старения оборудования, а также отличия в технологии проведения депоовского и заводского ремонтов.

В настоящее время система ремонтов моторвагонного подвижного состава регламентируется указанием ОАО «РЖД» № 622р от 06 апреля 2006 года «О планово-предупредительной системе технического обслуживания и ремонта моторвагонного подвижного состава», в соответствии с которым межремонтные пробеги электропоездов серии ЭТ-2М до «крупных» видов ремон-

The article discusses the use of indicators of reliability, calculated on the results of operation for the analysis of the technical state of the winding insulation of electric traction motors. It was found that different overhaul period failure intensity of traction motors due to the breakdown of the winding insulation is different.

Keywords: EMU, traction motor, reliability, operation time, failure intensity.

та составляют: ТР-3 – 350 тыс. км, КР-1 – 700 тыс. км, КР-2 – 2000 тыс. км.

Наработка большинства электропоездов серии ЭТ-2М после начала эксплуатации (НЭ) к настоящему времени близка к моменту проведения ремонта в объеме КР-1 или немного ее превышает, поэтому актуальной является задача оценки эксплуатационных показателей безотказности оборудования этих электропоездов в межремонтных периодах от НЭ до ТР-3 и от ТР-3 до КР-1.

В соответствии с ГОСТ Р 54461–2011 «Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения» эксплуатационный показатель надежности составной части единицы тягового подвижного состава – показатель надежности составной части единицы тягового подвижного состава, точечную или интервальную оценку которого определяют по данным эксплуатации.

В процессе эксплуатации информация о техническом состоянии оборудования электропоездов накапливается в первичной учетной документации, что позволяет ее использовать для расчетов эксплуатационных показателей надеж-

ности. При этом в качестве исходных данных используются наработки между отказами оборудования, зафиксированные в книге формы ТУ-29 «Книга повреждений и неисправностей локомотивов, моторвагонного подвижного состава и их оборудования». Наиболее подходящим показателем безотказности для анализа надежности в этом случае является параметр потока отказов $\omega(I)$.

Согласно ГОСТ Р 54461–2011 параметр потока отказов составной части единицы тягового подвижного состава – отношение числа отказов совокупности одноименных составных частей единиц тягового подвижного состава за определенный, достаточно малый, интервал наработки к суммарной величине их наработки в этом интервале.

По физическому смыслу этот показатель безотказности характеризует количество отказов одноименного оборудования, приходящееся на один его экземпляр в единицу (или интервал) наработки. Так как объем информации о наработках оборудования между отказами ограничен моментом проведения очередного планового ремонта, целесообразно для более точной оценки параметра потока отказов использовать группирование числа отказов в интервалах наработки. Это позволяет исключить ошибки в расчетах, связанные с конечным объемом выборки наработок до отказа.

Оценка величины параметра потока отказов $\omega^*(\Delta L)$ в интервале наработки ΔL осуществляется как

$$\omega^*(\Delta L) = \frac{\Delta m}{N(I)\Delta L},$$

где Δm – количество отказов одноименного оборудования в интервале наработки ΔL ;

$N(I)$ – общее количество одноименного оборудования, находящееся в эксплуатации в интервале наработки ΔL .

Оценив величину параметра потока отказов в различных интервалах наработки, строят диаграмму параметра

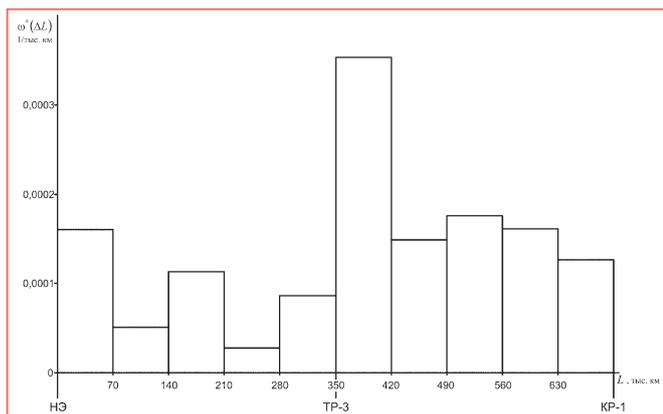


Рис. 1. Диаграмма параметра потока отказов тяговых электродвигателей по причине пробоя изоляции обмоток якоря.

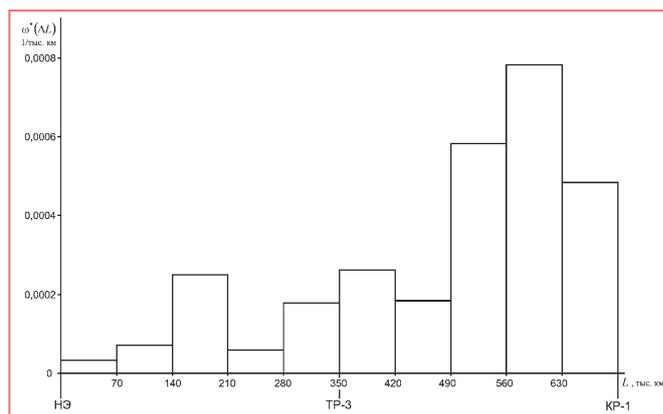


Рис. 2. Диаграмма параметра потока отказов тяговых электродвигателей по причине пробоя изоляции обмоток полюсов.

потока отказов, характер которой позволяет сделать вывод об изменении надежности рассматриваемого в расчете оборудования.

Основная составляющая в расходах на проведение ремонтов электропоездов относится к восстановлению изоляции обмоток тяговых электродвигателей, поэтому от ее надежности зависят общие затраты на проведение как плановых, так и внеплановых ремонтов.

С использованием описанной выше методики расчета получены диаграммы эксплуатационного параметра потока отказов тяговых электродвигателей электропоездов серии ЭТ-2М по причине пробоя изоляции обмоток якоря (рис. 1) и полюсов (рис. 2) для межремонтных периодов от НЭ до ТР-3 и от ТР-3 до КР-1.

Характер диаграммы параметра потока отказов тяговых электродвигателей по причине пробоя изоляции якоря позволяет сделать следующие выводы:

- в периоде от начала эксплуатации до ремонта ТР-3 надежность изоляции не ухудшается. Так как диаграмма параметра потока отказов имеет тенденцию к убыванию, то отказы в этом периоде носят приработочный характер;
- характерный вид типа «Гребенка» диаграммы параметра потока отказов в периоде от начала эксплуатации до ремонта ТР-3 обусловлен малым количеством отказов;
- после проведения ремонта ТР-3 происходит резкое возрастание параметра потока отказов за счет проявления конкомитантных отказов – отказов, вносимых в процессе технического обслуживания, регулировки, демонтажа и монтажа;
- в интервале наработки от 420 тыс. км и до момента проведения ремонта КР-1 параметр потока отказов

практически стабилен, но его величина находится на уровне приработочного периода после начала эксплуатации, то есть проведение ремонта ТР-3 в данном случае не приводит к улучшению технического состояния.

Для диаграммы параметра потока отказов тяговых электродвигателей по причине пробоя изоляции полюсов характерна тенденция к возрастанию как в периоде от начала эксплуатации до момента проведения ремонта ТР-3, так и в межремонтном периоде от ТР-3 до КР-1. При этом надежность изоляции полюсов до момента проведения ремонта ТР-3 и после него практически одинаковая, что говорит о его необходимости.

Исходя из этих выводов, можно сделать заключение, что сроки восстановления изоляции тяговых электродвигателей необходимо устанавливать на основании анализа эксплуатационных показателей безотказности.

Литература

1. Горский А.В., Воробьев А.А., Омарбеков А.К., Скребков А.В. Ремонт локомотивов с учетом их фактического состояния // Железнодорожный транспорт. – 2001. – № 9. – С. 43–45.
2. Воробьев А.А., Скребков А.В., Жакупов К.Б. Анализ надежности электровозов ВЛ80С в период гарантийного пробега после капитального ремонта // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. – 2008. – № 3. – С. 52–55.
3. Воробьев А.А., Горский А.В., Скребков А.В. Рационализация системы ремонта ТПС // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 64–68.
4. Воробьев А.А., Скребков А.В., Галко Д.П. Надежность изоляции якорей электромашин // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 76–78.
5. Горский А.В., Воробьев А.А., Скребков А.В. Стратегия интеллектуального ремонта локо-

мотивов // Локомотив. – 2012. – № 7. – С. 33–35.

6. Воробьев А.А., Скребков А.В. Оценка ресурса оборудования ТПС // Мир транспорта. – 2012. – № 5. – С. 38–41.
7. Горский А.В., Козырев В.А., Скребков А.В. Оптимизация сроков ремонта на основе интенсивности отказов // Мир транспорта. – 2012. – № 5. – С. 16–18.

Скребков Алексей Валентинович

Родился в 1979 году. В 2000 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электрический транспорт». Кандидат технических наук. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электропоезда и локомотивы» МГУПС (МИИТ). Имеет 55 печатных работ.

Шарапов Андрей Александрович

Родился в 1977 году. В 2000 году окончил МГУПС (МИИТ) по специальности «Электрический транспорт». В настоящее время работает первым заместителем начальника Центральной дирекции моторвагонного подвижного состава – филиала ОАО «РЖД». Имеет 7 печатных работ.

Skrebkov Alexey

Was born in 1979. In 2000 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering; specialty is «Electrical transport». He is candidate of technical sciences. In 2004 he defended a thesis; the theme is «Determination of the optimal structure of electric locomotives repair cycle in specific operating conditions». 15 years of work experience. At present he works as associate professor of «Electric train and locomotives» department of Moscow State University of Railway Engineering. He has 55 printed works.

Sharapov Andrey

Was born in 1977. In 2000 he graduated from Moscow State University of Railway Engineering; specialty is «Electric transport». At present, he works as deputy manager of top management motor train rolling stock – branch of Russian Railway Company. He has 7 printed works.

Математическое моделирование электромагнитных помех от системы зажигания автомобиля

// Mathematical modelling of electromagnetic interference from an automobile ignition system //

**Петровский С.В.,
Козловский В.Н., д.т. н.,
Белаушкин Е.В.,
СамГТУ, г. Самара**

В статье представлены результаты разработки и реализации математических моделей электромагнитных помех от системы зажигания.

Ключевые слова: качество, надежность, автомобиль, электрооборудование, система зажигания, электромагнитная совместимость.

При работе системы зажигания (СЗ) важным фактором ее взаимодействия с окружающей средой является электромагнитная совместимость (ЭМС) с другими бортовыми системами автомобиля и внешними устройствами, находящимися вблизи. Поэтому для оценки меры взаимодействия системы зажигания с данными устройствами нужно связать дуговые процессы между электродами свечи зажигания с уровнем и частотным диапазоном помех, возникающим при работе СЗ. Экспериментально решить эту задачу можно не всегда, поэтому менее затратным является математическое моделирование дуговых процессов в свече зажигания с последующей обработкой результатов моделирования, осуществляемого при помощи симметричного четырехполюсника, который работает в режиме длинной линии (что обусловлено высокими частотами, указанными ниже). Результатом данной работы является выявление уровня помех, что можно использовать для ЭМС системы зажигания с другими устройствами [9].

Работа электрооборудования конкретного автомобиля может потребовать значительного сокращения уровня радиопомех в зависимости как от относительной мощности помех, так и от возможности данного электрооборудования осуществлять подавление возникших помех. Эти требования различаются для разных автомобилей в зависимости

The article describes results of the development and implementation of mathematical models of electromagnetic interference from an ignition system.

Keywords: quality, reliability, automobile, electric equipment, ignition system, electromagnetic compatibility.

от типа автомобиля и требуемого радиуса действия аппаратуры.

По продолжительности действия излучения и его интенсивности помехи от системы зажигания практически всегда преобладают над другими помехами в районах интенсивного автомобильного движения – в зоне вблизи 100 м от автострэд, так как основной парк автотранспорта составляют автомобили с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), оснащенные батарейной системой зажигания. Их количество в мире в настоящее время – около 900 миллионов экземпляров [1].

В процессе работы система зажигания часто оказывается в сложных условиях, таких как обгон, резкое торможение, а также сложные погодные условия. Все эти факторы приводят к более интенсивному использованию системы зажигания, а значит, к усилению помех от нее. Работу СЗ во всех этих ситуациях трудно улучшить эмпирическим путем. Как уже было указано, на помощь в подобных ситуациях приходит математическое моделирование процессов дугообразования между электродами свечи зажигания.

Приведем краткое сравнение различных математических моделей, применяемых для анализа процессов дугообразования. В случае с системой зажигания, которая воспламеняет рабочую смесь в камере сгорания двигателя, теория Касси менее правдоподобна из-за

того, что в модели Касси предполагается, что температура в створе дуги постоянна и не зависит от тока, а мощность в створе дуги изменяется с током. При этом условия горения рабочей смеси и нагрузка постоянно меняются (пуск, разгон, движение с постоянной скоростью при постоянной нагрузке и тому подобное), что оспаривает факт постоянства температуры в створе дуги, так как теплоотвод при данных условиях будет разным. Математическое описание модели Майра получено из рассмотрения процессов в дуге при допущении, что рассеивание тепловой энергии в радиальном направлении обусловлено только теплопроводностью. Этот подход базируется на предположении термической ионизации и постоянства диаметра створа дуги в переходном режиме. Иными словами, мощность, выделяемая в дуге, постоянна и не зависит от изменения тока, а с током изменяется температура дуги, что в большей степени подходит при описании процессов горения дуги в свече зажигания.

По многочисленным опытным данным, которые получены в самых различных условиях и для различных значений тока и напряжения дуги, можно сказать, что теория Касси подтверждается при больших токах (сотни ампер), а теория Майра – при малых токах. Поэтому для систем зажигания, где токи в условиях горения дуги составляют 30–100 мА, модель Майра подходит больше. Есть также и другие модели, но их характеристики дают для системы зажигания большую погрешность. Математическое моделирование дуги производится по методу Рунге-Кутты в среде MathCAD, где дуга моделируется системой из пяти дифференциальных уравнений, которые были составлены на основе схемы замещения СЗ (рис. 1).

В данную схему входят:

- коммутатор, который получает сигналы с датчиков и коммутирует ток

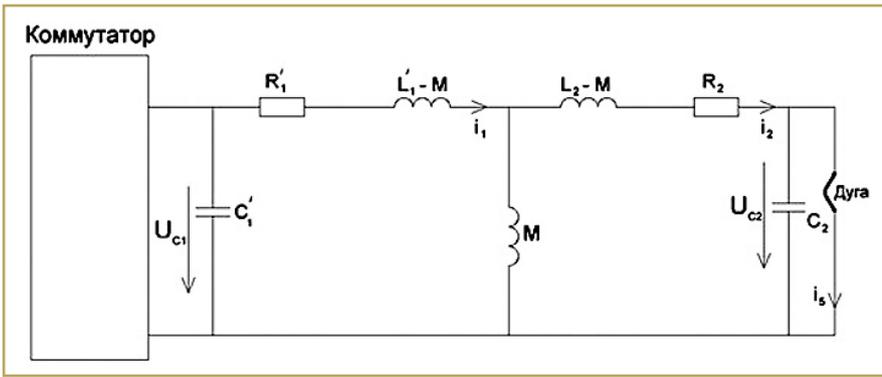


Рис. 1. Схема замещения СЗ.

разрыва, протекающий по первичной обмотке катушки зажигания;

- катушка зажигания, моделируемая эквивалентной схемой замещения;
- дуговой промежуток между электродами свечи зажигания;
- распределитель, сигнал на который поступает с выхода катушки зажигания. Он выполняет функцию распределения высоковольтных импульсов по проводам, причем в современном исполнении нет механических распределителей, поэтому распределение импульсов идет на индивидуальные катушки через электронный блок управления;
- высоковольтные провода, рассматриваемые как проводниковый материал.

Исходя из схемы замещения, составляются пять дифференциальных уравнений по числу неизвестных величин, для которых необходимо получить их зависимость от времени ($i_1(t)$, $U_{c1}(t)$, $i_2(t)$, $U_{c2}(t)$, $i_5(t)$), где $i_1(t)$ – ток в первичной обмотке катушки зажигания, $U_{c1}(t)$ – напряжение на первичной обмотке катушки зажигания, $i_2(t)$ – ток во вторичной обмотке катушки зажигания, $U_{c2}(t)$ – напряжение на вторичной обмотке катушки зажигания, $i_5(t)$ – ток дуги. Первые четыре уравнения составляются на основе токов и напряжений первичной и вторичной обмоток катушки зажигания. Пятое уравнение составляется для дугового промежутка и, как следствие этого, является нелинейным. Система уравнений составлена на основе параметров схемы замещения основными параметрами катушки зажигания 27.3705: $R_1 = 0,4 \text{ Ом}$; $R_2 = 5000 \text{ Ом}$; $L_1 = 3,8 \text{ мГн}$; $L_2 = 24 \text{ Гн}$; $M = 224 \text{ Гн}$; $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$; $C_2 = 30 \text{ пФ}$; $K_{mp} = 82$; $C_1' = 30 \text{ нФ}$; $R_1' = 2700 \text{ Ом}$; $L_1' = 23,96 \text{ Гн}$ – приведенные параметры катушки зажигания.

Сама система дифференциальных уравнений (1) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_1'}{dt} &= k_1(u_{c1}' + i_1'r_1') + k_2(u_{c2} + i_2r_2); \\ \frac{du_{c1}'}{dt} &= \frac{1}{c_1'} i_1'; \\ \frac{di_2}{dt} &= k_3(u_{c1}' + i_1'r_1') + k_4(u_{c2} + i_2r_2); \\ \frac{du_{c2}}{dt} &= \frac{1}{c_2} (i_2 - i_5); \\ \frac{di_5}{dt} &= \frac{(i_2 - i_5) \cdot i_5}{c_2 u_{c2}'} + \frac{1}{\theta} \left(\frac{u_{c2} i_5^2}{U_0 i_5 + P_0} - i_5 \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $k_1 = -0.5885$; $k_2 = -0.5859$; $k_3 = -0.586$; $k_4 = -0.626$ – коэффициенты, $P_0 = 100 \text{ Вт}$ – мгновенная мощность, выделяемая в дуге индуктивной фазы разряда, θ – постоянная времени дуги емкостной фазы разряда, при этом начальные условия для данных токов и напряжений берутся из расчета 1% от номинальных значений [2].

Последнее, пятое, уравнение получено по модифицированной модели Майра.

При этом четвертое и пятое уравнения в (1), фактически являющиеся входными данными с модели Майра, которая наилучшим образом описывает дуговые процессы в свече зажигания, можно

преобразовать в функцию помех. Для того чтобы осуществить данное преобразование, нужен цифровой фильтр, который лучше всего представить в виде электрической схемы замещения Т-образного четырехполюсника.

Для упрощения вычислительного эксперимента четырехполюсник можно сделать симметричным, то есть четырехполюсником, у которого схема одинакова относительно его входных и выходных зажимов, а это значит, что при перемене местами источника и приемника энергии их токи не меняются. В случае с системой зажигания следует упомянуть, что наибольшая энергетическая составляющая интенсивности помех приходится на высокочастотный диапазон от 30 МГц до 400 МГц, в котором сосредоточено около 90% мощности электромагнитных помех [3]. Для данного диапазона помех нельзя пренебрегать токами смещения и проводимостью изоляции [1].

Электрические цепи, в которых данное условие является обязательным, называются цепями с распределенными параметрами или длинными линиями [1]. Чтобы учесть изменение тока и напряжения вдоль линии, примем допущение, что каждый сколь угодно малый элемент линии обладает сопротивлением и индуктивностью, а между проводами – проводимостью и емкостью. Если индуктивность, сопротивление, проводимость и емкость равномерно распределены вдоль линии, то такую линию называют однородной, и она может быть изображена, как показано на рис. 2.

Пусть известны первичные параметры однородной линии, отнесенные к единице длины:

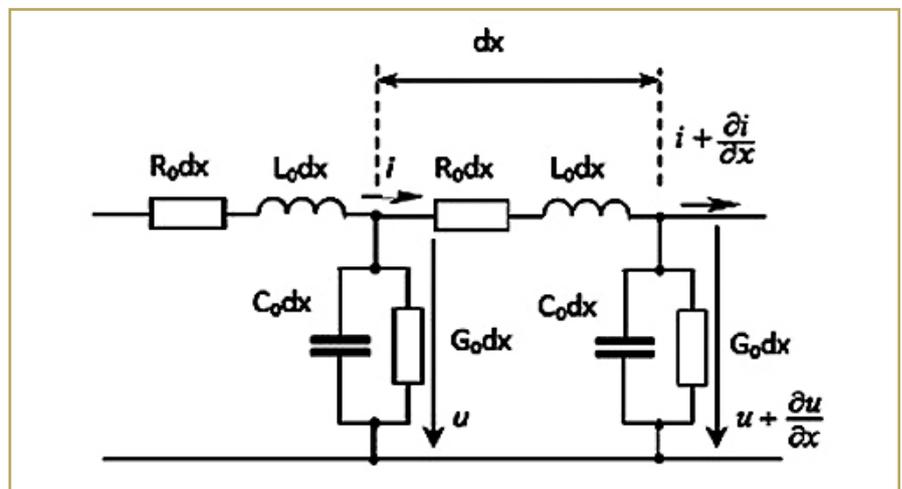


Рис. 2. Двухпроводная однородная линия.

r_0 – сопротивление прямого и обратного проводов [Ом/м];

L_0 – индуктивность петли, образуемой прямым и обратным проводами [Гн/м];

g_0 – проводимость (утечка) между проводами [См/м]; $g_0 \neq 1/r_0$;

C_0 – емкость между проводами [Ф/м];

u, i – напряжение и ток в начале выбранного элемента линии dx ;

$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx; i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$ – напряжение и ток в начале следующего элемента линии.

На основании законов Кирхгофа запишем систему уравнений (2) для рис. 2:

$$\begin{cases} u - (u + \frac{\partial u}{\partial x} dx) = \\ = r_0 dx i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial x} \\ i - (i + \frac{\partial i}{\partial x} dx) = g_0 dx + \\ + C_0 dx \frac{\partial}{\partial x} (u + \frac{\partial u}{\partial x} dx). \end{cases} \quad (2)$$

Приведем подобные члены, пренебрегая величинами второго порядка и сокращая на dx , получаем систему дифференциальных уравнений (3):

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial x} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial x}. \end{cases} \quad (3)$$

Электрически короткая линия ($l_3 < \lambda/4$) ведет себя подобно емкости; при длине $l_3 \approx \lambda/4$ – как последовательный колебательный контур; при длине $l_3 (\lambda/4, \lambda/2)$ – как индуктивность; при длине $l_3 \approx \lambda/2$ – как параллельный колебательный контур.

Бесконечно длинная линия имеет входное сопротивление, равное своему волновому сопротивлению.

При этом $Z_0 = r_0 + j\omega L_0$ – комплексное сопротивление линии единичной длины, $Y_0 = g_0 + j\omega C_0$ – комплексная проводимость линии единичной длины.

Решение уравнения (2.13) имеет вид $\dot{U} = \dot{A}_1 e^{-\gamma x} + \dot{A}_2 e^{\gamma x} = \dot{A}_1 e^{-(\alpha x + j\beta x)} + \dot{A}_2 e^{\langle \alpha x + j\beta x \rangle}$, (4)

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} & \text{ – коэффициент распространения.} \\ \dot{\gamma} & = \alpha + j\beta = \sqrt{Z_0 Y_0} = \\ & = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)}, \end{aligned} \quad (5)$$

α – коэффициент затухания;

β – коэффициент сдвига фаз;

A_1, A_2 – комплексные постоянные интегрирования.

В данном случае параметрами, описывающими электромагнитную совместимость системы зажигания, являются волновое сопротивление (Z_c), коэффициент распространения (γ) и угол сдвига фаз (θ), называемые вторичными параметрами однородной линии:

$$\begin{aligned} Z_c & = Z_c e^{j\theta} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \\ & = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} e^{j\theta}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{\omega(g_0 L_0 - r_0 C_0)}{r_0 g_0 + \omega^2 L_0 C_0}. \quad (7)$$

Параметры четырехполюсника, моделирующего переходные процессы в длинных линиях, для установления зависимости электромагнитных помех от работы системы зажигания автомобиля имеют вид

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} & = 10 \text{ МОм}; U_1 = 1000 \text{ В}; \Rightarrow \\ I_{\text{IP}} & = 0.1 \text{ мА}; P = 0.1 \text{ Вт}; \delta_1 = 0.1\%. \end{aligned}$$

Решая (3), получаем уравнения линии с гиперболическими функциями, связывающими U_p, I_1 с U_2, I_2 :

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 ch(\dot{\gamma} l) - Z_c \dot{I}_1 sh(\dot{\gamma} l), \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 ch(\dot{\gamma} l) - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} sh(\dot{\gamma} l) \end{cases} \quad (8)$$

где l – длина линии,

$$sh(\dot{\gamma} l) = \frac{e^{\dot{\gamma} l} - e^{-\dot{\gamma} l}}{2},$$

$$ch(\dot{\gamma} l) = \frac{e^{\dot{\gamma} l} + e^{-\dot{\gamma} l}}{2},$$

$$\omega \in (0.1 \div 108 \text{ МГц}).$$

Исходя из системы уравнений (8), находим напряжение и ток на вторичных зажимах четырехполюсника при нулевых начальных (граничных) условиях:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1 - Z_c \dot{I}_1 sh(\dot{\gamma} l)}{ch(\dot{\gamma} l)}; \quad (9)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_1 - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} sh(\dot{\gamma} l)}{ch(\dot{\gamma} l)}. \quad (10)$$

Математическую модель помех можно записать как

$$u_2(t) = \sum_{k=1}^{1000} u_k(t); \quad (11)$$

$$i_2(t) = \sum_{k=1}^{1000} i_k(t), \quad (12)$$

где $u_k(t)$ и $i_k(t)$ – гармоники тока и на-

пряжения, причем первая гармоника соответствует частоте $\omega = 0.1$ МГц; всего гармоник 1000. Каждая из гармоник описывается уравнением

$$u_k(t) = \frac{U_1 - Z_c I_1 sh(\dot{\gamma} l)}{ch(\dot{\gamma} l)} \sin k\omega t; \quad (13)$$

$$i_k(t) = \frac{I_1 - \frac{U_1}{Z_c} sh(\dot{\gamma} l)}{ch(\dot{\gamma} l)} \sin k\omega t. \quad (14)$$

Причем $U_1 = U_{c2}$ – это напряжение между электродами свечи зажигания, $I_1 = I_3$ – ток дуги, производные которых показаны в четвертом и пятом уравнениях в системе уравнений (1). Их значения известны с достаточно высокой точностью ($U_1 = U_{c2} = 1-1.5 \text{ кВ}; I_1 = I_3 = 30-100 \text{ мА}$), и их характеристики также известны из вышеприведенной (1) модели.

Напряжение $U_1 = U_{c2}$ и ток $I_1 = I_3$ в (10) являются входными данными четырехполюсника. Исходя из этого, найдем функцию помех $u_2(t), i_2(t)$ на основании включенных в модель уравнений (11–12). Далее по найденным значениям мы можем диагностировать повышенный уровень помех. После этого можно устранять помехи или уменьшать их уровень при помощи либо традиционных способов (демпферный резистор, заземление, конденсатор), либо с помощью интеллектуальных датчиков, встроенных в бортовые системы диагностики [7].

При моделировании в MathCAD функции помех $u_2(t)$ и $i_2(t)$, получаемых с выхода четырехполюсника, имеем погрешность полученной математической модели системы без помехоподавительного резистора по отношению к аналогичным экспериментальным данным на рис. 3 в диапазоне 6–18% по уровню помех. Погрешность такого уровня дает нам право утверждать соответствие нашей математической модели и экспериментальных данных.

Таким образом показано, что математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные, так как по рис. 3 видна динамическая погрешность 6–18%, что говорит о правильном подходе при моделировании. Данную погрешность можно уменьшить с помощью систем искусственного интеллекта [10].

Для обеспечения соответствия ЭМС в процессе эксплуатации и возможности проектирования систем зажигания с учетом требований ЭМС необходимо производить своевременную диагностику параметров системы зажигания в режиме ре-

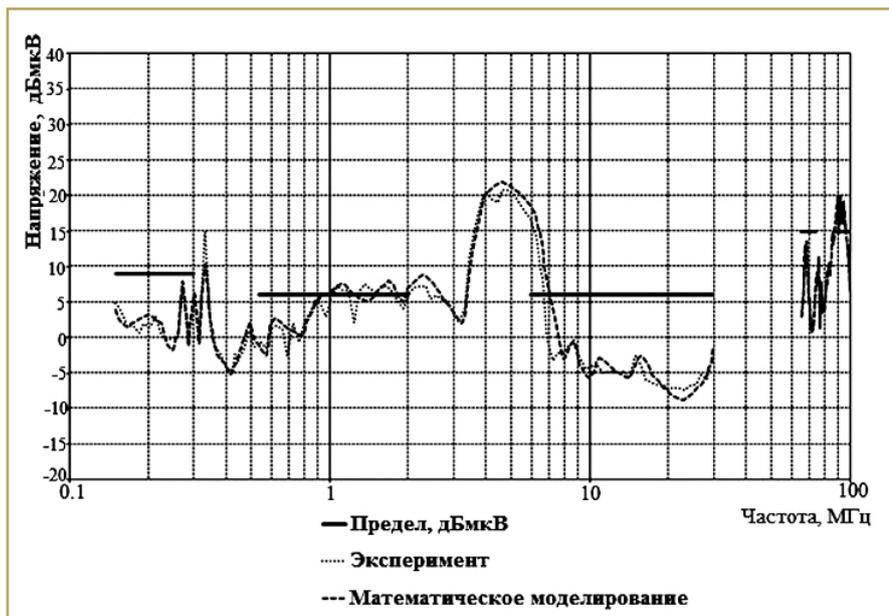


Рис. 3. Моделирование электромагнитных помех от системы зажигания.

ального времени и внебортовую диагностику при периодическом обслуживании. При этом необходимо, чтобы результаты моделирования, описанные в данной работе, были заложены в бортовые системы диагностики, чтобы можно было своевременно диагностировать неисправность.

Литература

- Семенов А.А. Теория электромагнитных волн / А.А. Семенов. – М.: МГУ, 1986. – 318 с.
- Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. Л.: Энергия, 1978.
- Николаев П.А. Электромагнитная совместимость современных автомобильных систем зажигания: монография / П.А. Николаев. – Тольятти: ПВГУС, 2011. – 224 с.
- Петровский С.В. Математическое моделирование процессов дугообразования в системе зажигания автомобиля // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». № 2 (24). Самара. СамГТУ, 2009.
- Петровский С.В. Исследование качества заземления автомобильной антенны на уровень наведенных помех // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». № 4 (36). Самара. СамГТУ, 2012.
- Петровский С.В. Интеллектуально-измерительная система для идентификации и классификации радиопомех от системы зажигания автомобиля // Сборник трудов пятой международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире 2015». Санкт-Петербург. СПбГУ, 2015. С. 89–99.

- Петровский С.В., Николаев П.А. Моделирование электромагнитных помех при работе системы зажигания автомобиля // Научные труды V международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Том 1. Томск. ТПУ, 2014. С. 355–359.
- Petrovski S., Bouchet F., Petrovski A. Data-driven Modeling of Electromagnetic Interferences in Motor Vehicles // IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA 2013) Albena, Bulgaria 2013. ISBN: 978–1–4799–0659–8. DOI: 10.1109/INISTA.2013.6577658. Pp. 1–7.
- Petrovski S., Rattadilok P., Petrovski A. Anomaly Monitoring Framework Based on Intelligent Data Analysis // In the Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning (IDEAL 2013), October 2013, Hefei, China. Springer Global, Lecture Notes in Computer Science, volume 8206, pp. 134–141. ISBN 978–3–642–41277–6. DOI: 10.1007/978–3–642–41278–3_17.
- Petrovski A., Rattadilok P., Petrovski S. Designing a context-aware cyber physical system for detecting security threats in motor vehicles // SIN'15 Proceedings of the 8th International Conference on Security of Information and Networks, Sochi, Russia. 2015. Pp. 267–270. ISBN 978–1–4503–3453–2. DOI: 10.1145/2799979.2800029.
- Ульямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т. Ульямс; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Технологии», 2004. – 540 с.

Петровский Сергей Валерьевич

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил СамГТУ по специальности «Электроснабжение по отраслям». Опыт работы – 16 лет. В настоящее время работает ведущим инженером кафедры «Электрические станции» СамГТУ. Имеет 38 статей, 1 патент.

Козловский Владимир Николаевич

Инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов», в 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт. Доктор технических наук. В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Автор более 150 научных работ, в том числе 10 монографий. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Белаушкин Евгений Валерьевич

Родился в 1993 году. В настоящее время магистрант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Petrovskiy Sergey

Was born in 1976. In 1999 he graduated from SamGTU with specialization in «Branch-wise electric supply». His work experience is 16 years. At present he works as leading engineer at the department «Electric power plant» of SamGTU. He has 38 articles and 1 patent.

Kozlovskiy Vladimir

Is an engineer, specialization is «Car and tractor electric equipment», in 1999 he graduated from Tolyatty Polytechnic Institute. Doctor of Engineering. In 2010 he defended a Dphil in the subject «Quality and safety assurance of car electric equipment system». He is an author of more than 150 scientific works, including 10 monographs. At present he works as department chairman «Theoretic and general electrotechnics» at the Samarskiy State Technical University (SamGTU).

Belaushkin Evgeny

Was born in 1993. At present he is a Master's Degree student of the department «Theoretic and general electrical equipment» at Samara State Technical University (SamGTU).

Комплексный анализ качества электрооборудования автомобилей по результатам гарантийной эксплуатации

// Complex quality analysis of car electrical equipment based on guarantee maintenance results //

Козловский В.Н., д.т.н., Киреев К.В., к.т.н.,
СамГТУ, г. Самара

Заятров А.В., к.т.н.,
ТГУ, г. Тольятти

В статье представлены результаты разработки и реализации комплекса информационно-аналитических инструментов, позволяющих проводить исследование текущих значений показателей качества электрооборудования автомобилей и их прогнозирование на будущие периоды.

Ключевые слова: качество, надежность, ремонтпригодность, удовлетворенность потребителей, автомобиль.

The article describes results of development and realization of research and information instruments which allow to investigate current indicator values of quality of car electrical equipment and their future forecast.

Keywords: quality, reliability, repair ability, customer satisfaction, car.

Оценка показателей качества высокотехнологичной продукции машиностроения, к числу которой относятся автотранспортные средства, является одной из важных составляющих в общей системе оценки эффективности деятельности предприятий автопрома.

Показатели, определяющие оценку качества, представляют собой эффективный срез информации, потенциально направленный к действиям по улучшению качества, поскольку именно качество в первую очередь определяет конкурентоспособность. Соответственно, несовершенства продукта или услуги снижают потребительские предпочтения в отношении определенных брендов [1, 4, 8].

Именно поэтому разработка и реализация комплекса информационно-аналитических инструментов, определяющих показатели качества автотранспортных средств в эксплуатации, являются актуальными научно-техническими задачами.

В настоящее время практика работы корпоративных служб качества автомобильных компаний нацелена на получение данных об уровне показателей: частоты отказов или несоответствий; удовлетворенности потребителей и т.д.

[2, 4]. Получается, что, несмотря на широкую известность ряда аналитических инструментов, например, таких как диаграмма Парето, использование их в качестве основных индикаторов оценки качества высокотехнологичной продукции автомобилестроения не всегда происходит системно [3]. Кроме того, использование каждого инструмента в отдельности дает единичный эффект и позволяет вскрывать только определенные особенности исследуемого объема данных из гарантии. При этом комплексное применение инструментов, определяющих различные аспекты исследования качества продукции, приводит к синергетическому эффекту, при котором в большей степени раскрывается картина формирования качества продукции в эксплуатации. Еще одним важным аспектом, на котором следует остановиться прежде чем перейти к определению цели исследования, является специфика автомобильной промышленности, заключающаяся в том, что современный продукт автомобилестроения чрезвычайно сложен и состоит из физически разноплановых систем: электрооборудование, кузов, двигатель внутреннего сгорания, тормозная система, подвеска, шасси и т.д. При этом ключевой задачей производителя является технически эффективная интеграция данных систем в едином объекте [3, 5].

Понимая на экспертном уровне, что конструкторское усложнение продукции ведет к снижению ее отказоустойчивости, автопроизводители в погоне за потребителем создают новые электротехнические и электронные системы, улучшающие комфорт и функциональность, при этом не повышая значительно стоимость продукта и гарантируя его надежность в течение длительного периода эксплуатации [6, 7]. Это происходит в условиях постоянного реформирования и модернизации автомобильных корпораций, на всех уровнях для сокращения затрат и повышения эффективности деятельности. Именно поэтому комплексность использования аналитических инструментов измерения показателей качества создает дополнительные возможности в решении глобальных корпоративных задач, связанных с обеспечением роста эффективности [12].

Целями данного исследования являются разработка и реализация научно-практического, информационно-аналитического комплекса инструментов, направленных на анализ и прогнозирование показателей качества электрооборудования автомобилей в сравнении с другими системами и элементами современных автотранспортных средств.

Упрощенная схема процессов, принимающих участие в мониторинге, прогнозировании и корректировке показателей качества продукции в период эксплуатации, представлена на рис. 1 [10]. Как видно из схемы, существуют процессы системы менеджмента качества промышленного предприятия, для которых определена ведущая роль в реализации деятельности по сбору информации и ее передаче в аналитический центр, где происходят анализ и прогнозирование качества продукции. Собственно продуктом аналитического центра

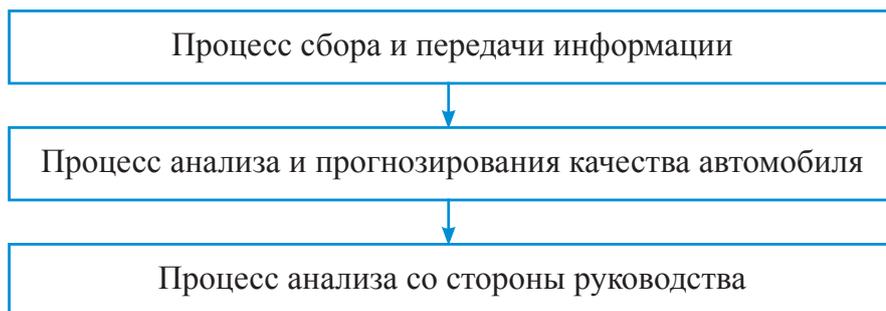


Рис. 1. Схема процессов.

компания является набор информации, регламентированный и формализованный по определенным правилам и требованиям. Именно этот набор является фундаментом процесса анализа со стороны руководства компании. От того, насколько он соответствует требованиям полноты, достоверности, оперативности и т.д., зависит правильность принятия решений в области качества со стороны высшего руководства [9].

Таким образом, процесс анализа данных о качестве продукции должен подчиняться правилам:

- оценка качества автомобилей и выбор информации по ним проводятся с обязательным указанием периода выпуска;

- для оценки качества автомобилей используются следующие показатели: рекламируемость, средняя дефектность, общие затраты, средние затраты, средняя трудоемкость, величина спектра дефектов;

- анализ качества автомобилей заключается в определении тенденций изменения качества объекта в целом и его частей, влияния на качество исследуемого объекта подразделений и поставщиков;

- инструментами анализа качества автомобилей служат диаграммы Парето, временные ряды, диаграммы сравнения, диаграммы потерь качества. При необходимости графическая информация дополняется табличной формой, помогающей раскрыть анализируемую информацию;

- на основе анализа качества автомобилей разрабатываются и принимаются стратегические решения по повышению качества и конкурентоспособности продукции.

Рассмотрим основные аналитические инструменты, которые необходимо использовать в анализе и прогнозировании качества новых автомобилей в эксплуатации, исходя из пред-

ложенных выше правил, с привязкой к конкретной информационной базе, отражающей уровень дефектности автомобилей, одной из ведущих марок за 2012–2015 гг.

Диаграммы Парето [3, 4] являются одним из семи широко применяемых инструментов для анализа качества продукции (рис. 2). Известно, что около 80% потерь, связанных с низким качеством, обусловлено небольшим количеством (20%) причин (принцип Парето 80:20).

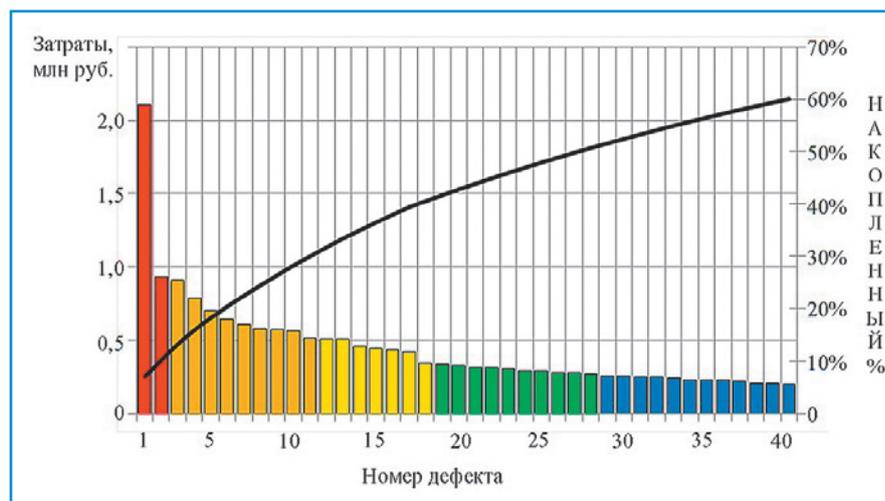


Рис. 2. Диаграмма Парето:

1 – не работает модуль зажигания; 2 – не работает датчик расхода воздуха; 3 – стук правой телескопической стойки; 4 – дефект счетчика пробега; 5 – заклинивает замок в положении «Стартер»; 6 – не работает тахометр; 7 – люфт, стук подшипника верхней опоры сойки; 8 – замыкают обмотки статора стартера; 9 – дефект контроллера; 10 – шум при работе генератора; 11 – дефект прокладки головки цилиндров; 12 – дефект патрубка дроссельного; 13 – обрыв цепи якоря стартера; 14 – дефект щетки стартера; 15 – дефект указателя скорости; 16 – дефект нейтрализатора; 17 – шум стартера; 18 – прочие дефекты генератора; 19 – стук левой телескопической стойки; 20 – дефект монтажного блока; 21 – дефект датчика положения дроссельной заслонки; 22 – обрыв цепи обмотки статора стартера; 23 – обрыв цепи электробензонасоса; 24 – не работает указатель уровня топлива; 25 – не создает давление электробензонасос; 26 – дефект прокладки масляного картера; 27 – течь редуктора привода спидометра; 28 – не работает электростеклоподъемник передней левой двери; 29 – не работает указатель температуры; 30 – не работает регулятор холостого хода; 31 – дефект маслоотражательных колпачков; 32 – не работает электростеклоподъемник задней левой двери; 33 – сгорание печатной схемы комбинации приборов; 34 – дефект уплотнительного кольца; 35 – занижено напряжение регулятора; 36 – заедает ведомый диск сцепления; 37 – пробой диодов выпрямительного блока генератора; 38 – дефект кислородного датчика; 39 – не работает реле стартера; 40 – дефект жгута проводов системы.

В анализе качества автомобилей используются диаграммы Парето, построенные по автомобилям определенного периода выпуска. Диаграммы Парето позволяют выделить те объекты, с которыми связаны наибольшие потери качества (по дефектам и затратам на устранение), и провести анализ этих объектов на основе временных рядов.

Построение диаграмм Парето проводится по всем показателям качества, выделяются основные объекты анализа (20%).

Как видно из рис. 2, из 40 наиболее затратных дефектов гарантийной эксплуатации 29 относятся к системе электрооборудования, более того, из 10 первых дефектов 7 относятся к рассматриваемой системе.

Временной ряд показателей качества [1, 3, 11] (рис. 3) используется для анализа изменения показателей и их прогнозирования. В анализе качества автомобилей используется временной

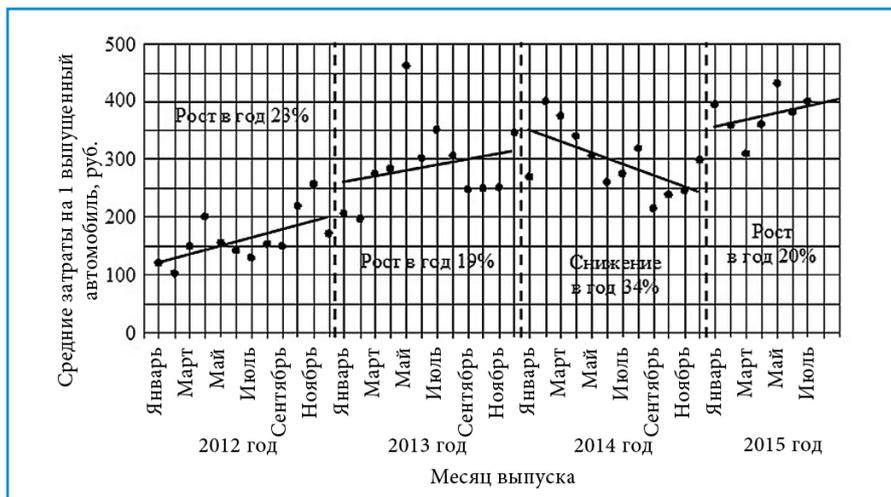


Рис. 3. Временной ряд «Средние затраты на один выпущенный автомобиль».

ряд, построенный по месяцам выпуска автомобилей. Определение тенденций изменения показателя и краткосрочное прогнозирование ведутся по линии тренда. Значимость тренда устанавливается на основе статистической значимости параметров линии тренда. Для исключения влияния инфляционных процессов затраты по автомобилям всех периодов выпуска пересчитываются в ценах (стоимость устранения дефектов) одного конкретного периода выпуска автомобилей. Выходная форма, содержащая временной ряд, сопровождается статистическими характеристиками: уравнением линейного тренда, значимостью тренда, средним значени-

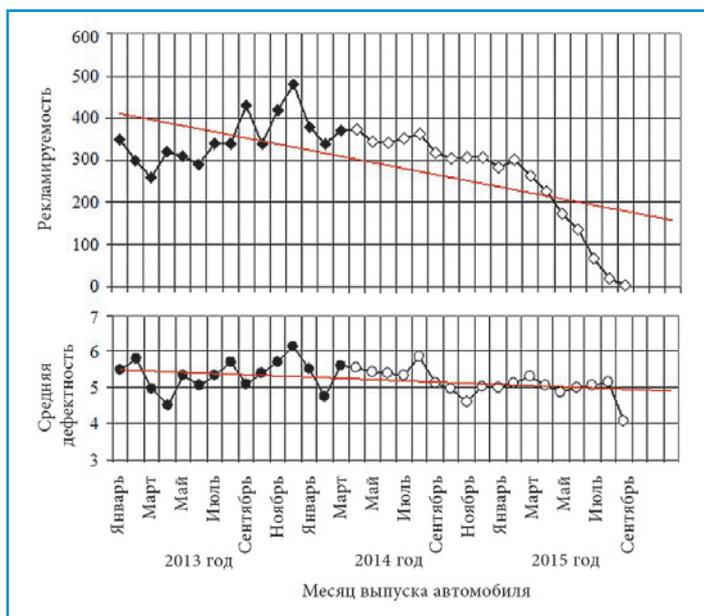


Рис. 4. Временные ряды «Рекламируемость» и «Средняя дефектность одного зарекламованного автомобиля».

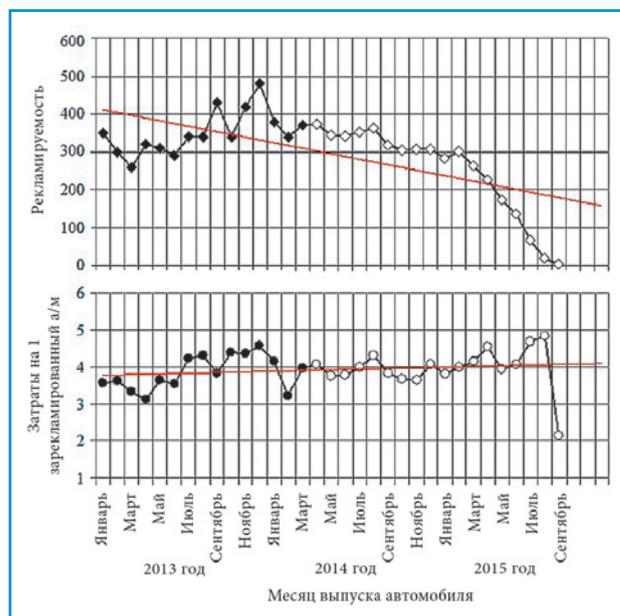


Рис. 5. Временные ряды «Рекламируемость» и «Средние затраты на один зарекламованный автомобиль».

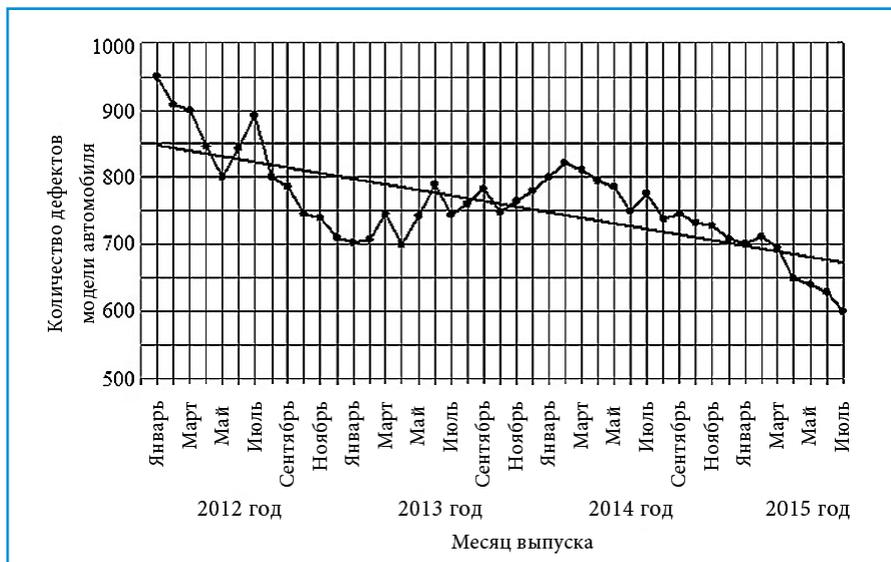


Рис. 6. Временной ряд «Динамика величины спектра дефектов автомобиля».

ем показателя качества, его изменением и прогнозом среднего значения.

Оптимальной является ситуация, в которой происходит снижение среднего значения показателя при одновременном уменьшении вариации. Последовательное возрастание показателей, выбросы, цикличность свидетельствуют о наличии особых причин, дестабилизирующих качество выпускаемых автомобилей. Временной ряд позволяет судить о тенденциях в изменении значений показателей качества, оценивать эффективность принятых ранее решений по управлению качеством как в целом по предприятию, так и по его подразделениям.

Ниже приведены примеры временных рядов по некоторым показателям

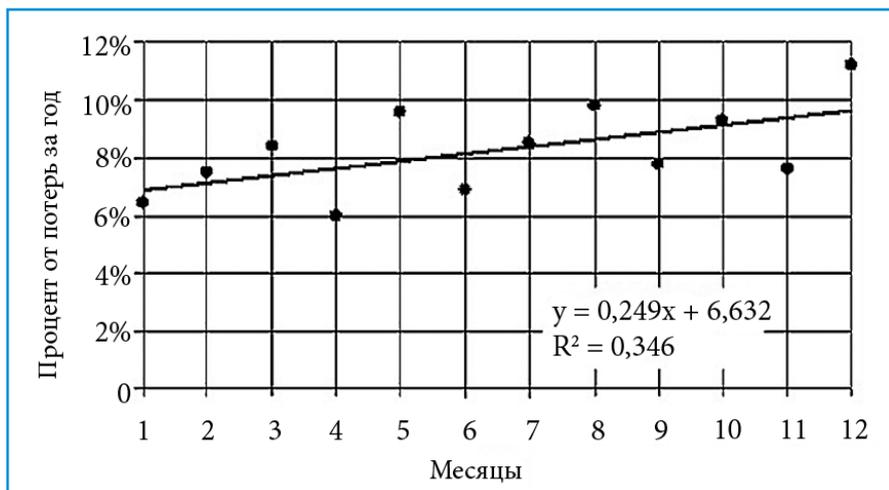


Рис. 7. Временной ряд «Динамика потерь качества в затратах».

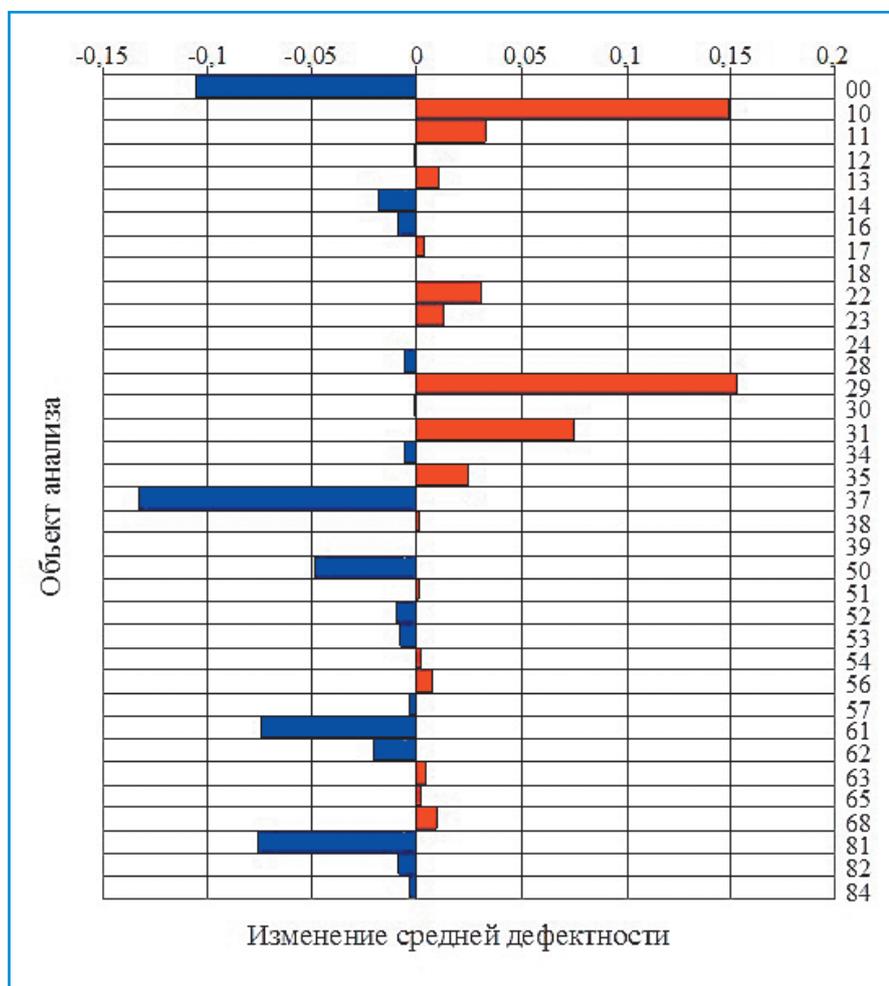


Рис. 8. Диаграмма сравнения «Изменение средней дефектности по группам»: 00 – автомобиль; 10 – двигатель; 11 – система питания; 12 – система выпуска; 13 – система охлаждения двигателя; 14 – электронная система; 16 – сцепление; 17 – коробка передач; 18 – коробка раздаточная; 22 – передача карданная; 23 – мост передний; 24 – мост задний; 28 – рама; 29 – подвеска; 30 – ось передняя; 31 – колеса; 34 – управление рулевое; 35 – тормоза; 37 – электрооборудование; 38 – приборы; 39 – инструмент и принадлежности; 50 – кузов; 51 – основание; 52 – окно ветровое; 53 – передок; 54 – боковина; 56 – задок; 57 – крыша; 61 – дверь передняя; 62 – дверь задняя; 63 – дверь задка; 65 – механизмы управления; 68 – сиденья; 81 – вентиляция; 82 – принадлежности; 84 – оперение.

качества. Временной ряд (рис. 3) показывает, что качество автомобиля по показателю «Средние затраты на один выпущенный автомобиль» ухудшается. Некоторое улучшение качества в 2015 году не изменило общей тенденции.

На рис. 4, 5 представлены диаграммы по следующим показателям качества: рекламируемость, средняя дефектность одного зарекомендованного автомобиля, средние затраты на один зарекомендованный автомобиль. Здесь используются следующие правила подачи информации: фактические значения показателей качества автомобилей, завершивших период гарантийной эксплуатации, – закрашенные; приведенные к моменту окончания гарантии по данным незавершенного периода гарантийной эксплуатации – пустые; средние затраты на один выпущенный автомобиль пересчитаны в ценах автомобилей, прошедших 6 и менее месяцев эксплуатации; линейный тренд показывает тенденцию изменения показателей качества.

Изменение спектра дефектов [5, 12] связано как с качеством производимой продукции, так и с уровнем требований потребителя. Величина спектра дефектов в 2015 году снизилась примерно на 30% (рис. 6).

Пример диаграммы, отражающей рост потерь качества, представлен на рис. 7.

Диаграммы сравнения предназначены для определения факторов, повлиявших на изменение величины показателя качества (рис. 8, 9). В анализе качества автомобилей используются данные, построенные по автомобилям определенного периода выпуска отчетного года в сравнении с автомобилями того же самого периода выпуска базового года. Диаграммы показывают, за счет каких моделей, модификаций, групп, подгрупп, узлов, деталей, дефектов произошло общее изменение уровня затрат и дефектности объекта анализа. Сравнительный анализ предназначен для определения причин, повлиявших на изменение величины показателя качества.

Наибольшее снижение затрат (рис. 9) произошло по таким дефектам, как «Разрушение заднего стекла от перенапряжения» (затраты снизились на 4181,5 тыс. руб. или на 97,7%), «Негерметичность блока цилиндров» (на 3567,5 тыс. руб. или на 72,0%), «Разрушение демпфера шкива коленвала» (на 2852,3 тыс. руб. или на 96,2%).

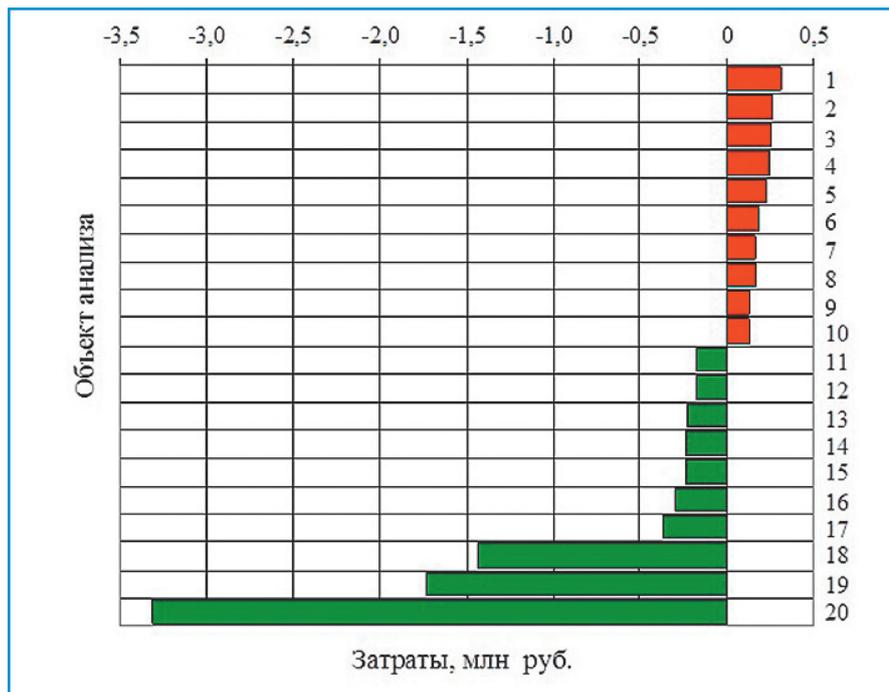


Рис. 9. Диаграмма сравнения «Дефекты, имеющие наибольшее снижение (-) или рост (+) затрат по объекту анализа»:

1 – дефект счетчика пробега; 2 – излом клапана; 3 – не работает электростеклоподъемник левый передний; 4 – не работает электростеклоподъемник правый передний; 5 – коробление диска переднего тормоза; 6 – люфт, стук подшипника верхней опоры стойки; 7 – обрыв впускного клапана; 8 – не работает электростеклоподъемник левый задний; 9 – не работает электростеклоподъемник правый задний; 10 – прочие дефекты генератора; 11 – течь сальника первичного вала; 12 – заклинивание передачи КПП; 13 – не работает реле стартера; 14 – не работает моторедуктор блокировки замка; 15 – задир зеркала цилиндра; 16 – дефект патрубка дроссельного; 17 – самоотворачивание, обрыв болтов ведомой шестерни; 18 – разрушение демпфера шкива коленвала; 19 – негерметичность блока цилиндров; 20 – разрушение заднего стекла.

Наибольший рост затрат произошёл по таким дефектам, как «Не работает электростеклоподъемник» (затраты выросли на 1137,2 тыс. руб. или на 47,6%), «Не работает модуль зажигания» (на 1081,1 тыс. руб. или на

38,2%), «Вибрация при торможении» (на 1 062,6 тыс. руб. или на 80,1%).

Диаграмма потерь качества [4] связывает показатели потерь с различными объектами и факторами, наиболее существенно влияющими на них, и позволяет



Рис. 10. Диаграмма потерь качества по подразделениям предприятия-автопроизводителя: МСП – механосборочное производство; СКП – сборочно-кузовное производство; УЗЭЭМ – управление закупок электроизделий и электроматериалов; УЗРП – управление закупок резинотехнической продукции; ГЕНДР – генеральная дирекция по техническому развитию.

наглядно оценивать соответствующие тенденции (рис. 10). Точками на диаграммах обозначены ответственные за качество продукции подразделения компании. Степень ответственности за качество связана с расстоянием до начала координат, то есть чем дальше объект находится от начала координат, тем больше потерь качества приходится на его долю.

На диаграмме (рис. 10) четко выделяются два производства, на долю которых приходятся основные потери качества завода в целом, – это МСП и УЗЭЭМ.

С учетом совместного рассмотрения диаграмм, представленных на рис. 9 и 10, можно сделать ряд выводов, подтверждающих существенный вклад системы электрооборудования в показатели дефектности и затраты на устранение отказов автомобилей в период гарантийной эксплуатации.

Так, доля дефектов автомобилей в эксплуатации по вине подразделения, занимающегося закупкой электроизделий (УЗЭЭМ), составляет около 33%, обеспечивая подразделению лидирующую позицию при составлении соответствующего антирейтинга. При этом, несмотря на некоторое снижение затрат в эксплуатации (рис. 8), их доля на устранение дефектов по системе электрооборудования составляет 30%, что также существенно. Рост затрат на устранение дефектов в системе электрооборудования отмечается по следующим позициям: дефект счетчика пробега; не работает электростеклоподъемник левый передний, правый передний; не работает электростеклоподъемник левый задний, правый задний; прочие дефекты генератора.

Таким образом, разработанный комплекс научно-практических инструментов, направленных на анализ и прогнозирование показателей качества, позволяет реализовать системную работу по мониторингу и прогнозированию показателей качества электрооборудования автомобилей в период гарантийной эксплуатации, обеспечивая при этом возможность уровневых переходов в процессе анализа данных с целью вскрытия ключевых проблем дефектности автомобилей, их причин, а также соответствующих центров ответственности компании-автопроизводителя.

Дальнейшие исследования в области аналитического сопровождения процессов управления качеством в машиностроении заключаются в созда-

нии гармоничной системы критериев качества, интегрирующей в себе совокупность технико-экономических показателей, обеспечивающих наиболее полную, достоверную и оперативную оценку с учетом современного уровня информационных технологий и требований перспективного стандарта ИСО 9001 версии 2015 года.

Литература

1. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров [пер. с англ.] / З. Брандт – М.: Мир, 2003. – 686 с.
2. Ватсон Г. Методология «Шесть сигм» для лидеров, или как достичь 3,4 дефекта на миллион возможностей [пер. с англ.] Раскина А.Л.; под науч. ред. Адлера Ю.П. / Г. Ватсон – М.: РИА «Стандарты и качество», 2006. – 224 с.
3. Годлевский В.Е., Плотников А.Н., Юнак Г.Л. Применение статистических методов в автомобилестроении / Под ред. Васильчука А.В. – Самара: ГП «Перспектива», 2003. – 196 с.
4. Годлевский В.Е., Юнак Г.Л. Менеджмент качества в автомобилестроении: монография / Под ред. Васильчука А.В. – Самара: ООО «Офорт»; ЗАО «Академический инжиниринговый центр», 2005. – 628 с.
5. Кокотов А.В. Совершенствование системы оценивания качества автомобиля на основных этапах его жизненного цикла. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.23. – Тольятти, 2002. – 185 с.
6. Панюков Д.И., Козловский В.Н. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей: монография. – Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH & Co., Deutschland, 2014. – 360 с.
7. Строганов В.И. Обеспечение качества автомобилей и гибридов в эксплуатации: монография. – Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH & Co., Deutschland, 2015. – 397 с.
8. Строганов В.И., Клейменов С.И. Модели аналитических исследований качества и надежности легковых автомобилей в эксплуатации // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 9. – С. 2–6.
9. Проект стандарта предприятия «Анализ и прогнозирование качества автомобилей по результатам гарантийной эксплуатации». – Самара: «Академический инжиниринговый центр», 2002. – 25 с.
10. Разработка методов оценки экономической эффективности мероприятий и проектов, направленных на повышение качества продукции. Технический отчет по направлению «Оценка эффективности корректирующих действий в информационной системе «Учет, планирование и контроль мероприятий по улучшению качества автомобилей». Тольятти, 2003. – 48 с.
11. Шиндовский Э., Шюрц О. Статистические методы управления качеством. – Москва, 1976. – 600 с.
12. Юнак Г.Л., Годлевский В.Е., Иванов Г.В. Методические материалы. Планирование и применение FMEA конструкции, технологии и оборудования на ОАО «АВТОВАЗ». – Самара, 2005. – 176 с.

Козловский Владимир Николаевич

Инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов», в 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт. Доктор технических наук. В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Автор более 150 научных работ, в том числе 10 монографий. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Киреев Кирилл Владимирович

Родился в 1960 году. Окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Электрические системы». Кандидат технических наук, доцент. В 1990 году защитил диссертацию на тему «Программируемая коммутация в аппаратах с жидкометаллическим контактом». Опыт работы – 30 лет. В настоящее время работает заместителем заведующего кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Имеет более 100 научных трудов.

Заятров Алексей Викторович

Родился в 1988 году. В 2010 году окончил Тольяттинский государственный университет по специальности «Электрооборудование автомобилей и электромеханика». Кандидат технических наук. В 2013 году защитил диссертацию по теме «Комплексная оценка качества и надежности электрооборудования легкового автомобиля». Опыт работы – 6 лет. В настоящее время работает начальником исследовательской лаборатории НИЧ Тольяттинского государственного университета. Автор более 35 научных статей.

Kozlovskiy Vladimir

Is an engineer, specialization is «Car and tractor electric equipment», in 1999 he graduated from Tolyatty Polytechnic Institute. Doctor of Engineering. In 2010 he defended a Dphil in the subject «Quality and safety assurance of car electric equipment system». He is an author of more than 150 scientific works, including 10 monographs. At present he works as department chairman «Theoretic and general electrotechnics» at the Samarskiy State Technical University (SamGTU).

Kireev Kirill

Was born in 1960. He graduated from Kuibyshev Polytechnic Institute with specialization in «Electrical systems». He is a Candidate of Engineering Sciences, associate professor. In 1990 he defended a thesis in the subject «Software switching in devices with liquid metal contact». His work experience is 30 years. At present he works as deputy head of the department «Theoretical and general electrotechnics» of Samara state technical university (SamGTU). He has more than 100 publications.

Zayatrov Alexey

Was born in 1988. In 2010 he graduated from Tolyatti State University with specialization in «Car electrical equipment and electrical engineering». He is a Candidate of Engineering Sciences. In 2013 he defended a thesis in the subject «Complex quality and reliability control of car electrical equipment». His work experience is 6 years. At present he works as head of the research laboratory of the research department in Tolyatti State University. He is an author of 35 publications.

О типовом государственном (муниципальном) контракте на выполнение НИОКР

Приказом Минобрнауки от 21 октября 2015 года № 1180 утверждены типовые контракты на выполнение НИОКР, заключаемые организациями, подведомственными Минобрнауки РФ, типовые условия контракта при использовании результатов интеллектуальной деятельности (РИД), включаемые в контракты на выполнение работ, оказание услуг, а также информационная карта типового контракта, типовых условий контракта.

Типовой контракт предусматривает следующие разделы:

- «Предмет Контракта»;
- «Общие положения Контракта»;
- «Стоимость (цена) работ и порядок оплаты»;
- «Порядок приемки исполнения обязательств»;
- «Права и обязанности Заказчика»;
- «Права и обязанности Исполнителя»;

- «Ответственность Сторон»;
- «Порядок разрешения споров, претензии Сторон»;
- «Права и обязанности Сторон, связанные с использованием РИД»;
- «Срок действия, изменение и расторжение Контракта (Договора)».

Раздел «Права и обязанности Сторон, связанные с РИД» может быть включен в контракт в одном из двух вариантов. Первый вариант относится к случаю, когда исключительные права закрепляются за исполнителем. Второй вариант – к случаю, когда исключительные права закрепляются за Российской Федерацией (субъектом Российской Федерации, муниципальным образованием).

Закрепление исключительных прав за Российской Федерацией (субъектом Российской Федерации, муниципальным образованием) предусмотрено в случае, если:

- результаты научно-технической деятельности изъяты из оборота;
- Российская Федерация приняла на себя осуществление финансирования работ по доведению результатов научно-технической деятельности до стадии практического применения, завершающейся этапом постановки продукции на производство, включающим подготовку производства, изготовление установочной серии и квалификационные испытания;
- результаты научно-технической деятельности созданы в ходе научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, выполняемых во исполнение международных обязательств Российской Федерации.

Краснов Л.А.

*Редакция журнала
«Электроника и электрооборудование транспорта»*

Об учете количества полученных патентов и секретов производства (ноу-хау) при предоставлении субсидий на возмещение части затрат на создание научно-технического задела по разработке базовых технологий и на уплату процентов по кредитам

Постановлениями Правительства РФ от 17 февраля 2016 года № 109 и № 110 утверждены Правила предоставления из федерального бюджета субсидий российским организациям на возмещение части затрат на создание научно-технического задела по разработке базовых технологий производства приоритетных электронных компонентов и радиоэлектронной аппаратуры и Правила предоставления из федерального бюджета субсидий российским предприятиям радиоэлектронной промышленности на компенсацию части затрат на уплату процентов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях на цели реализации проектов по созданию инфраструктуры отрасли, в том числе кластеров в сфере радиоэлектроники.

Правила устанавливают порядок, цели и условия предоставления субсидий российским организациям.

Субсидии предоставляются в рамках подпрограмм государственной программы Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы» в целях стимулирования деятельности организаций электронной и радиоэлектронной промышленности по разработке и производству радиоэлектронной аппаратуры, комплексов и систем в области телекоммуникационного оборудования, вычислительной техники, специального технологического оборудования и систем интеллектуального управления, а также в целях создания, расширения и модернизации технологической и производственной баз для их производства.

Субсидии предоставляются организациям, прошедшим конкурсный отбор. При отборе организаций на право получения субсидии учитывается рейтинг заявки организации. Конкурсная комиссия определяет рейтинг каждой заявки в соответствии с утвержденной методикой. При расчете рейтинга заявки на участие в конкурсе учитывается и рейтинг, присуждаемый заявке по критерию, касающемуся количества полученных патентов и (или) секретов производства (ноу-хау). Значимость удельного веса этого рейтинга в суммарном рейтинге заявки составляет 10 процентов.

Краснов Л.А.

*Редакция журнала
«Электроника и электрооборудование транспорта»*

Сведения об авторах

К.т.н., доцент
Шаронов Геннадий Иванович
+7-961-353-77-55

Гусев Сергей Александрович
(8352) 22-27-51

Д.т.н., профессор
Косарев Александр Борисович
+7-499-260-41-02

К.т.н.
Люминарская Екатерина
Станиславовна
+7-905-508-92-14

Д.т.н., профессор
Овсянников Евгений Михайлович
+7-910-422-85-32

Мурадов Эльхан Шахбаба оглы
+7-343-368-75-89

Д.т.н., профессор
Власьевский Станислав Васильевич
+7-914-547-54-47

К.т.н.
Доманов Виктор Иванович
+7-8422-41-18-63

К.т.н.
Скребков Алексей Валентинович
+7-910-408-11-53

Петровский Сергей Валерьевич
+7-927-702-64-95

Д.т.н.
Козловский Владимир Николаевич
8-917-978-83-56

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Рекламные материалы принимаются в форматах «.cdr», «.eps» или «.tif» (300 dpi). Цветовая модель – CMYK. Все шрифты должны быть переведены в кривые.

Авторские материалы. Текст статьи в формате «.doc» (Microsoft Word). Обязательно наличие аннотации, ключевых слов и списка используемой литературы. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Все рисунки в форматах «.cdr» или «.eps», фотографии – в формате «.tif» (300 dpi). Каждый рисунок или фотография должны быть представлены отдельным файлом.

СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

(6 номеров) – **6 000 руб.**, в т.ч. НДС 18%

Оформить подписку можно:

– через редакцию – необходимо направить по факсу или электронной почте заявку с указанием банковских реквизитов, наименования организации (фирмы), точного почтового адреса и количества комплектов журнала.

Тел./факс: (495) 500-40-20, 557-23-95,

e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2016 г., индекс 59990.

СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

2-я и 3-я страницы обложки – 24 000 рублей;

4-я страница обложки – 30 000 рублей;

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей.

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право корректорской и редакторской правки публикаций без согласования с авторами.

Журнал распространяется через редакцию по адресной рассылке, через ОАО «Агентство Роспечать», на специализированных выставках и симпозиумах.